

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

FOTOGRAMMETRICKÁ ANALÝZA OBRAZŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JANA VELEBOVÁ

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

FOTOGRAMMETRICKÁ ANALÝZA OBRAZŮ

PHOTOGRAMMETRIC IMAGE ANALYSIS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JANA VELEBOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Doc. Dr. Ing. PAVEL ZEMČÍK

BRNO 2011

Abstrakt

Tato práce je věnována fotogrammetrické analýze obrazu, díky které je možné z fotografií pomocí zvolených metod určit polohu a rozměry objektů na nich zaznamenaných. Jsou zde vysvětleny základy fotogrammetrie a jejího současného využití. Kapitoly zaměřené na zpracování digitálního obrazu popisují jeho vlastnosti, možnosti zpracování a vyhledání klíčových bodů pro kalibraci scény. Pro ucelený přehled jsou v závěru práce uvedeny příklady existujícího softwaru, jeho možnosti a využití v praxi.

Abstract

This thesis is dedicated photogrammetric image analysis that makes it possible from your photos with the help selected methods to determine the location and dimensions of objects recorded on them. There are explained the basics of photogrammetry and its current application. Chapters focused on digital imaging describing its characteristics, treatment options and key points findability for the scene calibration. For a comprehensive view are in this thesis introduced examples of existing software, its possibilities and use in practice.

Klíčová slova

Fotogrammetrie, měření vzdálenosti, epipolární geometrie, fundamentální matice, kalibrace kamery

Keywords

Photogrammetric, distance measurement, epipolar geomery, fundamental matrix, camera calibration

Citace

Jana Velebová: Fotogrammetrická analýza obrazů, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2011

Fotogrammetrická analýza obrazů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením pana Doc. Dr. Ing. Pavel Zemčíka

.....
Jana Velebová
1. srpna 2011

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat všem co mi poskytli pomoc při řešení této diplomové práce, především mému vedoucímu panu Doc. Dr. Ing. Pavlovi Zemčíkovi za odbornou pomoc a Ing. Milanovi Macků za materiály a zpřístupnění programů pro zpracování dokumentace dopravních nehod.

© Jana Velebová, 2011.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	Úvod	3
2	Shrnutí současného stavu	5
2.1	Fotogrammetrie	5
2.2	Digitální obraz	10
2.3	Parametry objektivu	11
2.4	Model kamery	13
2.4.1	Základní model dírkové kamery	13
2.4.2	Vnitřní parametry reálné kamery	14
2.4.3	Parametry optického zkreslení objektivu	15
2.4.4	Vnější parametry kamery	17
2.5	Projekční matice	19
2.6	Epipolární geometrie	19
3	Aplikace fotogrammetrie v praxi	22
3.1	Software využívaný v oblasti dopravy	22
3.2	Metody využívané pro zpracování fotodokumentace	26
3.3	Využití vozidlových kamer	30
4	Analýza a návrh	34
4.1	Implementační prostředí	35
4.2	Kalibrace fotoaparátu	35
4.3	Detekce bodů a jejich korespondence	37
4.4	Rekonstrukce bodu v prostoru	39
4.5	Kalibrace scény	39
4.5.1	Určení vzdáleností a rozměrů objektů na fotografii	40
5	Implementace	41
5.1	Kalibrace pomocí šachovnice	41
5.2	Redukce optického zkreslení a detekce rohů	43
5.3	Rekonstrukce bodu ve scéně	43
5.3.1	Zadání korespondenčních bodů	43
5.3.2	Výpočet fundamentální matice	44
5.3.3	Výpočet souřadnic epipólů	44
5.3.4	Stanovení projekčních matic	45
5.4	Kalibrace scény	45
5.5	Určení vzdálenosti	46

6	Zhodnocení výsledků	47
6.1	Zpracování virtuální scény	47
6.2	Zpracování reálné, zaměřené scény	48
6.3	Nevhodná scéna pro zpracování v aplikaci	50
7	Závěr	52
A	Detailní výpis výsledných hodnot	56
A.1	Virtuální scéna s krychlí	56
A.2	Reálná scéna s autem	57
B	Uživatelské rozhraní aplikace	59
C	Technické vybavení pro záznam digitálního obrazu	62
C.1	Fotoaparát Nikon D5000	62
C.2	Objektiv Nikon 18-55 mm F 3,5-5,6 G AF-S DX VR	63
D	Kalibrační vzor	65
E	Obsah CD-R	66

Kapitola 1

Úvod

Fotografie je nositelem informací a vyjadřuje určitý obsah, který je vázán na dané místo, v daném čase a je vytvořen s určitým úmyslem. Fotografie se na rozdíl od reality časem nemění. Pomineme-li mechanické poškození, vady ovlivněné kvalitou použitého materiálu či vady vzniklé časem. Toho se dá využít a díky fotogrammetrii lze z fotografií získat mnoho cenných informací.

Jedná-li se o snímky osobního charakteru, vzniklé rozdíly je možné zanedbat. Jsou-li ale fotografie určené k dokumentaci, je pro nás důležité dostat z fotografie informací co nejvíce. Ne vždy lze dané místo znovu vyfotit a přeměřit, protože během času mohlo dojít i k rozsáhlým změnám. To může být problém. Zejména u fotografií zkoumaných s odstupem času je snazší zpracovávat fotografie vytvořené dle určitých zásad, díky kterým i po letech lze z fotografií získat mnoho informací, týkajících se zaznamenaných objektů a scény samotné.

Zvláště v případě dopravních nehod není možné vybírat denní dobu, roční období ani počasí. Fotografie bývají pořizované narychlo, za snížené viditelnosti, z nekvalitních fotoaparátů a ne vždy na nich bývá zaznamenáno to nejdůležitější. S tím je však nutné počítat.

V minulosti se pokusy o různé měření a zpracovávání zaznamenaných objektů objevují již před vývojem fotografie samotné. Většinou však nebyly moc využívány, protože pozorované objekty se musely nejdříve ručně překreslit a to nebylo moc praktické. S rozvojem fotografie se objevují snahy zaznamenávat na fotografiích architektonické památky, přírodní scenérie a umělecká díla i pro budoucí generace či možné rekonstrukce.

Rychlým rozvojem informačních technologií se rozvíjely i algoritmy, využívané právě na zpracování fotografií. A díky nim, bylo i po letech možné z fotografií mnohé informace opět získat. Ne vždy to však bylo snadné. Využívané algoritmy byly složité a technické vybavení neumožňovalo jejich pohodlné zpracování. Dnes je tomu jinak. K dispozici máme moderní technologie a algoritmy, díky kterým můžeme složité výpočty realizovat i mimo vědecké laboratoře se superpočítači.

Jednou z možností, jak z fotografií získat potřebné informace je právě využití fotogrammetrie. Díky jejímu mnohaoborovému využití se stále vyvíjí a zdokonaluje. Své využití nachází i v oblasti dopravy, kde bývá využívána při zkoumání dopravních situací, převážně dopravních nehod. Z informací, které lze z fotografií získat je možné zrekonstruovat průběh nehody a dále zhodnotit, jak se celá situace udála. To má své uplatnění například při řešení soudních sporů a pojistných podvodů. Software využívaný v současnosti je finančně nákladný, a to je jeden z důvodů, proč se tomuto tématu věnuji ve své diplomové práci.

V souvislosti s fotogrammetrií se setkáváme s mnoha pojmy, které zasahují do několika odvětví. Proto je kapitola 2 rozdělena do několika částí, které se jednotlivě věnují fotogram-

metrii samotné, jejímu vývoji a využití. Další sekce jsou věnovány modelu kamery od jeho definice až po jeho aplikaci v epipolární geometrii, kterému je věnován zbytek kapitoly.

Využití fotogrammetrie v oblasti dopravy rozebírá kapitola 3, ve které je uveden částečný přehled softwaru využívaného při zpracovávání fotodokumentace dopravních nehod. Druhá část této kapitoly je podrobněji věnována aplikaci zvolených metod na fotodokumentaci s příkladem vyhodnocení dopravní nehody. Závěr této kapitoly rozebírá problematiku využití vozidlových kamer.

Následující kapitola 4 rozebírá známé metody a shrnuje návrh řešení, který je využit pro implementaci aplikace, která je rozebrána v kapitole 5. Kde jsou rozebrány jednotlivé kroky vedoucí k rekonstrukci kalibrované scény, ve které lze následně zjišťovat relevantní vzdálenosti.

Kapitola 6 shrnuje dosažené výsledky na vstupních obrázcích z virtuální a reálné scény.

Závěr 7 práce je věnován celkovému shrnutí dané problematiky rozebrané v této práci. Zabývá se dosaženými výsledky a možným rozšířením aplikace.

Kapitola 2

Shrnutí současného stavu

2.1 Fotogrammetrie

V této sekce je pojem fotogrammetrie rozebrán do několika částí. Nejprve je pozornost věnována obecné definici, kterou rozšiřují informace o fotografiích, jejich pořízení a následné zpracování v mnoha různých oborech. Závěr této kapitoly je věnován historickému vývoji zaměřenému převážně na vznik a první zmínky o fotogrammetrii.

Úvod do fotogrammetrie

Teoretické počátky fotogrammetrie spadají do období, kdy ještě nebyla vyvinuta fotografie. Slovo fotogrammetrie je řeckého původu a vzniklo složením tří slov **photos** - světlo, **gramma** - záznam a **metron** - měřit. V průběhu letitého vývoje bylo zaznamenáno mnoho definic. Níže je jedna z nich.

***Fotogrammetrie** je věda, způsob a technologie, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálního modelu terénu a dalších produktů, které lze získat z obrazového, nejčastěji fotografického záznamu [10].*

Fotogrammetrii lze také využít k rekonstrukci tvaru, určování polohy a měření rozměrů objektů zaznamenaných na fotografii. Fotografie je záznam scény pořízený fotoaparátem. Dle použitých technologií rozlišujeme záznam analogový a digitální. V principu je zaznamenáváno světlo odražené od objektů ve scéně, které prochází objektivem po definovanou dobu, tzv. expozici a je zaznamenáno na světlocitlivý materiál. A tím se jednotlivé technologie liší. K dispozici máme různé typy zařízení s různou přesností.

- **Analogový záznam** využívá světlocitlivou vrstvu na fotografickém filmu, přesněji na negativu. Výsledkem zpracování negativu je fotografie na fotografickém papíře. Výhodou této metody je, že z negativu můžeme vytvářet kopie různých rozměrů bez ztráty kvality. Dříve byly fotografie černobílé. S rozvojem technologií vnikly fotografie barevné.
- **Digitální záznam** zprostředkovává světlocitlivý snímač (CMOS, CCD) uvnitř těla fotoaparátu. Parametry snímače a objektivu mají významný vliv na kvalitu fotografie.

Můžeme vytvářet fotografie jakékoli barevnosti a odstínu. Více informací je možné nalézt v kapitole 2.2.

Podle polohy snímacího zařízení dělíme fotogrammetrii do tří kategorií. Každá z kategorií bývá většinou využívána v různých odvětvích.

- **pozemní fotogrammetrie** je metoda technicky méně náročná. Záznamové zařízení je umístěné na povrchu Země. Je to stabilní metoda, při které můžeme využít delších expozičních časů. Kvalitu snímků tolik neovlivňuje vliv počasí. Nevýhodou této metody je množství nevyžádaných objektů bránících ve snímání.
- **letecká fotogrammetrie** se vyznačuje pořizováním snímků nad povrchem Země. Snímání probíhá z pohybujícího se objektu jako jsou letadla a vrtulníky. Kvalitu snímků ovlivňuje stav počasí a kvalita snímacích zařízení. Nevýhodou této metody je vysoká cena použitých technologií a cena spojená s letovým provozem. Výhoda spočívá ve zaznamenávání rozsáhlých oblastí sledovaného území.
- **družicová fotogrammetrie** vznikla v šedesátých letech. Zpočátku však byla spíše špiónážního charakteru. Později se družicové snímky používaly k tvorbě fotomap a to i v České republice. Snímky z družic pro své zpracování potřebovaly speciální software, který dokázal pracovat i s velkým rozlišením. Kvalita snímků je opět ovlivněna počasím a kvalitou snímacího zařízení. Využívá se při dálkovém průzkumu Země (DPZ)

Fotogrammetrické metody provádí sběr informací a měření nepřímou. Měření probíhá na snímcích zobrazujících měřený objekt. Dle počtu zpracovaných snímků dělíme fotogrammetrii na:

- **jednosnímkovou**, nebo také rovinnou fotogrammetrii. Vyznačuje se zpracováním jednoho snímku na kterém je umožněno měřit pouze rovinné souřadnice (2D). Vztah popisující zpracování jednosnímkové fotogrammetrie se nazývá kolineace a je vyjádřen projektivní transformací. Využívá se například pro tvorbu fotoplánů rovinných objektů.
- **vícesnímková** fotogrammetrie jak již název napovídá zpracovává nejméně dva částečně překrývající se snímky pro tvorbu 3D zobrazení. Měřený objekt, nebo jeho část musí být viditelně zobrazena na všech používaných snímcích. Za jistých podmínek lze využít **stereoskopii**. A to v případě, mají-li snímky přibližně rovnoměrné osy záběru. Jsou-li osy záběru snímku konvergentní jedná se o tzv. vícesnímkové prostorové promítání (technologicky vzato mluvíme o tzv. **průsekové fotogrammetrii**).

Některé postupy fotogrammetrie lze zařadit i do deskriptivní geometrie. Novodobé poznatky už ale potřebují něco víc. Zpracování snímků je složitější a je založené na propracovaných matematických principech. S rozvojem technologií máme dnes zcela jiné možnosti než před několika lety. Můžeme provádět výpočty, které byly v minulosti natolik složité, že nebyly vůbec používány.

Řešení těchto algoritmů lze provést analyticky, s využitím vyspělejší technologie, přímo na počítačích, nebo na složitých mechanicko-optických vyhodnocovacích přístrojích.

Fotogrammetrie má své využití má v mnoha oborech. Například v geodézii a kartografii, ve stavebnictví k rekonstrukci staveb (na obrázku 2.1 je znázorněn příklad využití

fotogrammetrie k rekonstrukci katedrály), pro měření deformací a k vytváření dokumentací, pro účely památkové péče, zemědělství při mapování osevních plánů a měření sklonu svahů, v lesnictví pro tvorbu prostorových, těžebních, a kalamitních map, ve vodním hospodářství pro modelaci povodí, rozvodí a digitalizaci terénu, ve strojírenství, v medicíně k dokumentaci léčebných úkonů a pooperační péči, v plastické chirurgii a při tvorbě náhrad, v antropologii, v ekologii, v urbanismu pro tvorbu 3D modelů měst, v designu pro určování a modelování tvarů a pro policejní účely při vytváření simulací, vyměřování dopravních nehod a pro kriminalistickou dokumentaci.



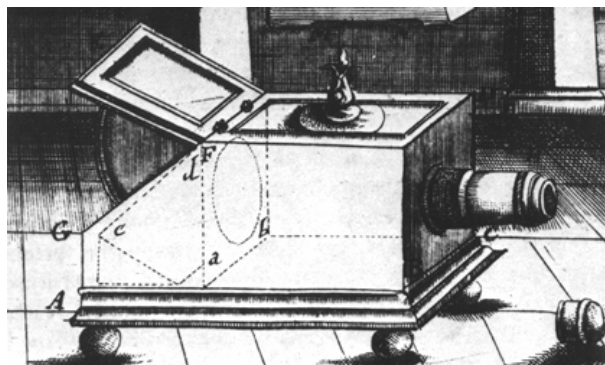
Obrázek 2.1: Díky tomuto snímku byla Francouzská katedrála v Berlíně o 100 let později od pořízení snímku rekonstruována, převzato z [6]: a) Francouzská katedrála v Berlíně z roku 1882, b) Současná podoba Francouzské katedrály v Berlíně

Historie

První pokusy o záznam objektů a zobrazovací metody se objevují již v době Leonarda Da Vinciho, který žil v letech 1452 - 1519. Sám Leonardo Da Vinci sestrojil tzv. dírkovou kameru, díky které bylo možné překreslit pozorovaný předmět pomocí centrální projekce. Předpokládáme-li, že jsou snímky středovými průměty měřených objektů, můžeme dokonce počátek fotogrammetrie datovat ještě dříve. A to kolem roku 1032, v době života arabského učenice Al Hassana bin Al Haithama (965 - 1039), který jako první popsal tzv. **cameru obscuru** 2.2.

Počátky fotogrammetrie samotné se objevují kolem roku 1851. Za její zakladatele jsou považováni Aimé Laussedat a Albrecht Meydenbauer. Od té doby se mnohé změnilo a ať už se vývoj fotogrammetrie promítl do historie a různých odvětví jakkoli, s jistotou můžeme říct, že to nebyl marný boj. Protože rozvoj fotogrammetrie byl a je spletitý, jsou zde uvedeny a krátce popsány pouze ti, kteří jsou považováni za její zakladatele.

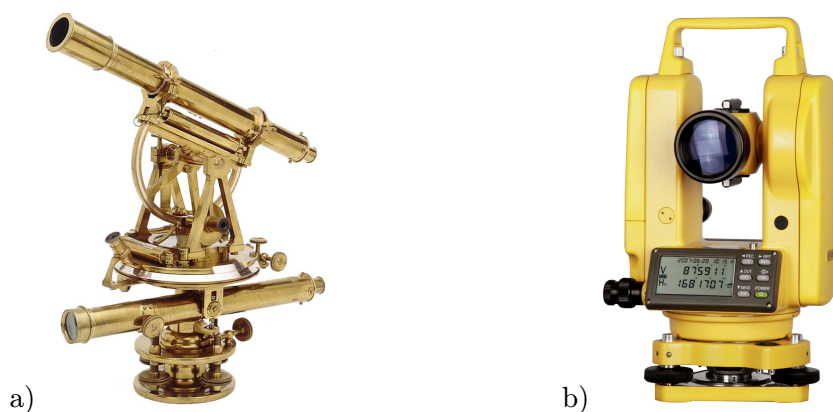
K rozvoji fotogrammetrie v Čechách přispěl profesor pražské techniky K. Kořistka, který se s ní seznámil na své studijní cestě přímo u A. Laussedata. Po návratu své znalosti využil v Praze. Díky jeho fotografiím z Hradčan a z Petřína a průsekové fotogrammetrii určil polohu věží a jiných významných bodů tehdejšího území Prahy.



Obrázek 2.2: Tzv. reflexní camera obscura Johannese Zahna uvedena roku 1685 v Zahn, J., *Oculus Artificialis* (1685 - 1686) z Gernsheim, H., "The Origins of Photography", převzato z [20]

Aimé Laussedat (15.dubna 1819 Moulins (Allier) - 18.března 1907 Paříž)

Byl francouzský důstojník, zeměměřič, kartograf, fotograf a astronom. Je považován za otce fotogrammetrie [1]. Od roku 1849 realizuje rozsáhlé výzkumy o využití fotografie pro tvorbu topografických map. Snažil se rozvinout i techniku leteckého snímkování. Ze snímků pořízených z balonu se mu podařilo vytvořit i několik topografických map. Přesto se tato metoda ukázala jako nevhodná. Hlavním problémem bylo, získat dostatek snímků pokrývajících celou oblast z jedné pozorovací stanice. Jako lepší způsob pro pozemní fotografování se ukázalo využití fototeodolitu.



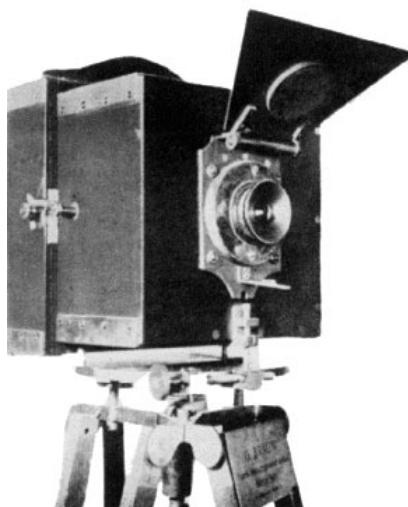
Obrázek 2.3: Ilustrační ukázka teodolitu: a) z roku 1840, b) teodolitu současnosti

Pro porovnání jsou na obrázku 2.3 zobrazeny teodolity z různým odstupem vývoje. Vlevo je zobrazen teodolit používaný přibližně kolem roku 1840, vpravo je ukázka současného teodolitu, tzv. totální stanice.

Alebrecht Meydenbauer (30.dubna 1834 Tholey - 15.listopadu Bad Godesbedgu)

Byl německý architekt. Jeho hlavním cílem bylo zachránit národní kulturní dědictví Německa. Snažil se nahradit přímé měření objektů na nepřímé zpracování z fotografických obrazů. Usiloval o to dokázat, že na fotografické snímky lze ukládat informace o objektech detailně a s velkou přesností.

Hlavním problémem bylo sestavit fotografický a měřicí přístroj v jednom. První úspěchy zaznamenává v létě roku 1867, kdy vytvořil metrické snímky kostela a terénní snímky pro topografické účely. Zde použil tzv. pantoskop, zobrazený na obrázku 2.4, se širokouhlou čočkou z optické produkce Emila Busche. Ohnisková vzdálenost čočky byla 25 cm, formát snímků byl 30 x 30 cm a především disponoval vlastnostmi metrické kamery.



Obrázek 2.4: První fotogrammetrická kamera z roku 1867, převzato a upraveno z [6].

Vlastnosti metrické kamery:

- definovaná obrazová rovina - realizována pomocí mechanického rámečku vtlačeného na fotografickou destičku
- souřadný systém - tvořený mřížkou, která byla na fotografickou destičku vykreslena v době expozice
- pevně nastavené ohnisko - pro definici základních vzdáleností
- stativ - zajišťující stálé vertikální a horizontální nastavení fotoaparátu pro všechny snímky

Díky svým pokusům dokázal, že fotogrammetrie je vhodná metoda pro architektonické a topografické práce. I přesto nebyla jeho metoda dosud přijata. V tomto období se Meydenbauer poprvé setkal s prací Aimé Laussedata, který pracoval na topografické aplikaci jeho metody nazvané *Métrophotographie*. Na podnět svého přítele však Meydenbauer ve svém článku použil poprvé termín *fotogrammetrie*. Tento článek byl publikován v časopise architektury v prosinci 1867 [6]. Později byl tento termín přijat na celém světě.

Do oblasti fotogrammetrie zasahuje mnoho pojmů, které nemusejí být zcela známé. Tato kapitola obsahuje pouze částečný přehled problematiky, který je pro objasnění důležitých pojmů stěžejní. Nejprve je věnována pozornost digitálnímu obrazu. Následně je popsán základní model kamery, který má hlavní roli ve zpracování a vyhodnocování digitálních fotografií s využitím výpočetních algoritmů zaměřených na prostorové vlastnosti. Dále je popsána epipolární geometrie a rektifikace.

2.2 Digitální obraz

Lze rozdělit na obraz vektorový a rastrový (bitmapový). Liší se nejen způsobem pořízení, ale také metodami zpracování.

Vektorový obraz

Vektorový obraz je reprezentován pomocí vektorů. Obrázek je složen z přesně definovaných geometrických primitiv (bodů, přímek, křivek a mnohoúhelníků), které mohou mít barevnou lineární, či přechodovou výplň. Jeho specifické vlastnosti se vyznačují tím, že:

- je možné bez ztráty kvality libovolně zvětšovat, či zmenšovat
- práce s jednotlivými objekty probíhá odděleně
- obvykle má menší paměťové nároky (do určité úrovně složitosti)

Na druhou stranu, pořízení vektorového obrazu bývá složitější a souvisí s nutností využití vektorových 2D či 3D editorů. Obecně je vektorová grafika využívána v různých odvětvích strojírenství, stavitelství, lékařství, v polygrafii a počítačové grafice.

Mezi nejznámější vektorové editory patří například AutoCad (Autodesk), Adobe Illustrator, Adobe Flash, CorelDraw, Inkscape a mnoho dalších. Ze zástupců 3D editorů je to Inventor (Autodesk), Blender a jiné.

Rastrový obraz

Rastrový obraz je reprezentován body, tzv. pixely, uspořádanými do pravidelné mřížky. Každý pixel má definovanou polohu a barvu. Kvalita obrazu je dána jeho rozlišením a barevnou hloubkou.

- **Rozlišení obrazu** udává počet pixelů horizontálně krát počet pixelů vertikálně. Například rozlišení monitoru může být 1920 x 1080 (16:9).
- **Barevná hloubka** definuje počet bitů použitých pro popis barvy. Například označení "True color" odpovídá 24-bitové hloubce, tj. 2^{24} , celkově tedy 16 777 216 barev.

Nevýhodou rastrových obrazů je paměťová náročnost daná rozlišením a barevnou hloubkou obrazu. Změna velikosti obrazu může vést ke zhoršené kvalitě obrazu. Přesto je však pořízení rastrového obrázku velmi snadné. Stačí mít pouze fotoaparát či scanner. Další variantou je modifikace různých rastrových obrázků či exportováním vektorových obrázků. Stejně jako ve většině případů je pojem "digitální obraz" chápán jako obraz rastrový.



Obrázek 2.5: Porovnání vektorového a rastrového obrazu

Aby bylo možné digitální obraz zpracovávat dle zvolených algoritmů, je nutné jej nejdříve vytvořit a uložit. Způsoby pořízení ovlivňují možnosti dalšího zpracovávání. Jedná se především o kvalitu a potřebné informace o samotném obrazu, scéně a zařízení, kterým byl obraz vytvořen.

- **Primární digitální obraz** je obraz pořízený přímo fotoaparátem, nebo kamerou. Kvalita snímků je dána kvalitou a nastavením snímacího zařízení. Nedochází ke ztrátám cenných informací, zvláště o přístroji, kterým byl záznam vytvořen.
- **Sekundární digitální obraz** je obraz vytvořený procesem tzv. digitalizace z již existujícího obrázku. Lze jej realizovat naskenováním, nebo opětovným vyfotografováním. Sekundárním zpracováním však dochází ke zhoršení kvality obrazu a ke ztrátě informací, které by mohly být pro další zpracování důležité. Jedná se především o rozlišení a barevnou hloubku obrazu, vlastnosti fotoaparátu, kamery či scény ve které byl původní obrázek vytvořen.

2.3 Parametry objektivu

Ohnisko

Ohnisko objektivu definuje zorný úhel, neboli výřez scény, který bude zaznamenán. Existují dva typy objektivů. Objektivy s proměnným ohniskem, které umožňují tzv. zoom (přiblížení a oddálení) a objektivy s pevným ohniskem. Konstrukčně jednodušší a tím i kvalitnější a světlejší jsou objektivy s pevným ohniskem. Práce s nimi však může být trochu nepohodlná. Aby bylo možné ostře zaznamenat požadovaný výřez scény, je nutné se s fotoaparátem pohybovat.

Objektivy dle ohniskové vzdálenosti lze rozdělit na více typů. Celkový přehled je uveden v tabulce 2.1. Na obrázku 2.6 je znázorněna ukázka několika typů objektivů s různou ohniskovou vzdáleností.

Clona

je nastavitelný mechanický prvek objektivu 2.7, který reguluje množství světla procházejícího objektivem a dopadajícího na snímač fotoaparátu. Množství dopadajícího světla je

TYP	OHNISKOVÁ VZDÁLENOST	POPIS
Rybí oko	8 mm	extrémně širokoúhlé objektivy s úmyslně deformovanou perspektivou
Širokoúhlé	10-30 mm	určeny pro focení interiérů, kulturních památek, přírodních scénérií
Střední (základní)	30-100 mm	bez zkreslení, určeno pro normální focení
Teleobjektivy	100-300 mm	pro snímání vzdálených objektů, krajiny, sportu, zvířat, ...
Silné teleobjektivy	více jak 300 mm	obdobné využití jako normální teleobjektivy
Makro objektivy	-	focení detailů na velmi krátké vzdálenosti
Tilt-Shift	-	architektura
Mirror	600 mm	obdoba hvězdářských dalekohledů

Tabulka 2.1: Typy objektivů dle ohniskové vzdálenosti



Obrázek 2.6: Ukázka různých typů objektivů s různou ohniskovou vzdáleností, převzato a upraveno z [22]

ovlivněno plochou otvoru vzniklou ve středu clony. Pomocí clony lze určit světelnost objektivu. Nastavení clony ovlivňuje hloubku ostrosti. Ta udává do jaké vzdálenosti je možné objekty na fotografii považovat za ostré.



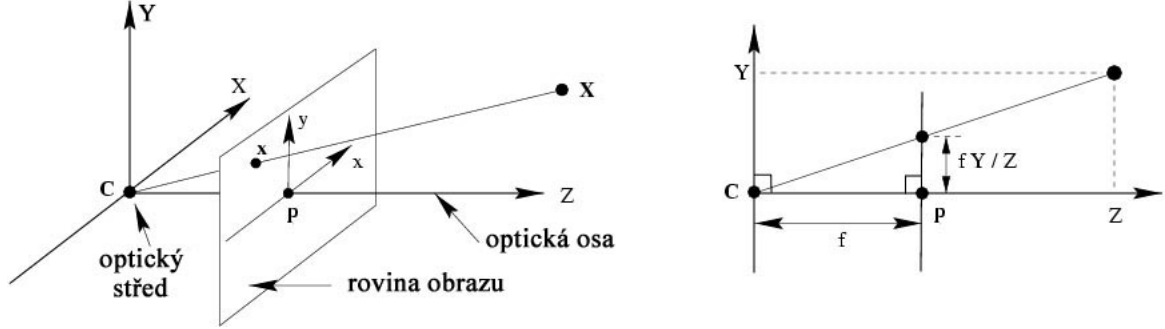
Obrázek 2.7: Clona objektivu, převzato a upraveno z [23]

2.4 Model kamery

Matematických modelů popisujících vlastnosti kamery existuje více. Tato sekce je zaměřena na obecný model dírkové kamery s centrální projekcí.

2.4.1 Základní model dírkové kamery

Dírková kamera je vzhledem ke svým projekčním vlastnostem nejvíce podobná vlastnostem lidského oka. Tento jednoduchý model byl principiálně navržen pro optické snímáče typu CCD. Jeho využití je však širší a je možné jej použít i na ostatní typy optických snímáčů.



Obrázek 2.8: Základní model dírkové kamery, převzato z [12].

Bod **C** na obrázku 2.8 označuje optický střed (*camera center*), umístěný do počátku soustavy souřadnic, **p** je projekční bod (*principal point*), který definuje místo průniku optické osy (*principal axis*) s rovinou obrazu (*image plane*). Přímka vedoucí z optického středu do roviny obrazu se nazývá optická osa, **X** označuje pozorovaný bod, **x** jeho obraz a **f** označuje ohniskovou vzdálenost¹.

Terminologie jednotlivých symbolů se v literatuře může lišit, proto jsou pro přehlednost v závorkách uvedeny pojmy v anglickém jazyce.

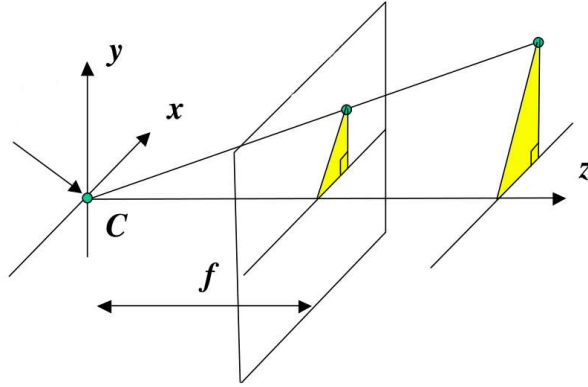
Souřadnice bodu **X** v prostoru lze zapsat výrazem $X = (X, Y, Z)$. Jeho obraz vznikne právě v místech, kde prochází spojnice bodu **X** a optického středu **C** rovinou obrazu. Jak je vidět v pravé části obrázku 2.8 (názorněji v obrázku 2.9) je možné pro výpočet souřadnic bodu **X** využít metodu podobných trojúhelníků. Zobrazení bodu **X** na bod **x** popisuje výraz 2.1.

$$(X, Y, Z)^T \mapsto (fX/Z, fY/Z)^T \quad (2.1)$$

Jsou-li reálné objekty a body v obraze reprezentovány homogenními vektory, je možné centrální projekci jednoduše vyjádřit jako lineární zobrazení mezi jejich homogenními souřadnicemi. Přesněji lze zapsat výraz jako násobení matic následovně:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

¹Ohnisková vzdálenost digitálních fotoaparátů určuje vzdálenost ohniska od roviny obrazu (optického snímáče)



Obrázek 2.9: Centrální projekce, převzato a upraveno z [11]

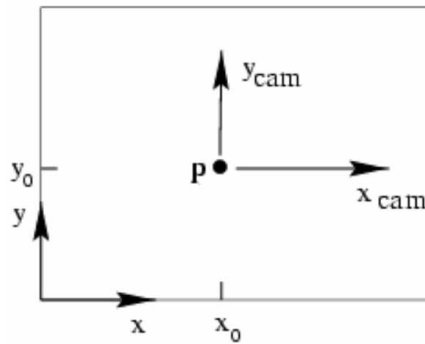
Matici v tomto výrazu je možné zapsat jako $P = \text{diag}(f, f, 1)[I|0]$, kde $(f, f, 1)$ reprezentuje diagonálu matice a $[I|0]$ definuje celou matici rozdělenou na blok 3×3 a sloupcový vektor. V tomto případě vektor nulový.

Při zachování notace bodu X v prostoru reprezentovaného homogenním 4-vektorem, bodu x v obrazové rovině reprezentovaného homogenním 3-vektorem a 3×4 homogenní projekční maticí P , lze zapsat výraz 2.2 jako

$$x = PX \quad (2.3)$$

2.4.2 Vnitřní parametry reálné kamery

V obecném modelu dírkové kamery nebyly zohledněny technologické nedostatky reálné digitální kamery. Mezi tyto nedostatky patří odchýlení projekčního bodu senzoru od optické osy, jak je vidět na obrázku 2.10.



Obrázek 2.10: Obrazový souřadný systém (x, y) , souřadný systém kamery (x_{cam}, y_{cam}) a projekční bod p , převzato z [7]

Proto je nutné výraz 2.1 upravit na:

$$(X, Y, Z)^T \mapsto (fX/Z + x_0, fY/Z + y_0)^T \quad (2.4)$$

kde hodnoty x_0 a y_0 vyjadřují odchylku projekčního bodu optického snímače od optické osy, která vychází z optického středu a je shodná s osou Z .

Je nutné s tím počítat i ve výrazu 2.2, který lze upravit na:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX + Zx_0 \\ fY + Zy_0 \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & x_0 & 0 \\ & f & y_0 \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Dalším parametrem je zkreslení pixelu dané optickým snímačem (např. CCD², CMOS³). Toto zkreslení se vyznačuje jiným, než čtvercovým rozměrem pixelu. Tato vada bývá znakem nekvalitních snímačů.

Obecně lze zapsat kalibrační matici K jako

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

V matici 2.6 značí s parametr zkreslení, který popisuje úhel, který svírají osy x a y na snímači. Ve většině případů má tento parametr hodnotu 0. Parametr zkreslení f_x udává měřítko (počet pixelů na délkovou jednotku) ve směru osy x a f_y ve směru osy y a lze jej vypočítat dle výrazu 2.7. V ideálním případě jsou tyto hodnoty stejné.

$$f_x[px] = x_0 \left[\frac{px}{mm} \right] * F[mm] \quad (2.7)$$

Parametry Kalibrační matice jsou nezávislé na dané scéně. To znamená, že je lze využívat pro výpočty tak dlouho, dokud nedojde ke změně ohniskové vzdálenosti. V praxi je změna ohniskové vzdálenosti realizována nastavením tzv. zoomu, díky kterému je možné pozorovat z jednoho místa různé výřezy scény. V takových případech je nutné přepočítat.

Hodnoty získané kalibrací není snadné ověřit. K jejich ověření by bylo nutné součástky fotoaparátu či kamery přeměřit. Což by prakticky znamenalo jejich rozebrání.

Mezi další vnitřní parametry, zejména co se týká vlastností objektivu, patří také radiální a tangenciální zkreslení, kterému je věnována následující sekce.

2.4.3 Parametry optického zkreslení objektivu

Objektiv je tvořen někdy i velmi složitými soustavami čoček, které jsou uspořádány tak, aby docházelo k co nejmenšímu zkreslení objektů viditelných na fotografii. Vyrobit čočku bez zkreslení je takřka nemožné. Ve výrobním procesu a konstrukci objektivů se tato vada reguluje s větší, či menší úspěšností.

Důsledkem je deformace obrazu patrná zejména směrem k jeho okrajům. Jak je vidět na obrázku 2.11. Vzniká různě velkým zvětšením resp. zmenšením předmětu ve středu a na okrajích obrazu. Může být znakem nekvalitních objektivů, přesto se s ním lze setkat i u drahých a kvalitních objektivů. V některých případech bývá zkreslení dokonce i úmyslně ponecháno.

²Charge Coupled Device - pracuje na principu převodu světla dopadajícího na fotocitlivý materiál na elektrický náboj, který je následně měřen a převeden do digitální podoby

³Complementary Metal Oxide Semiconductor - pracuje na podobném principu jako CCD



Obrázek 2.11: Vlevo obrázek s výrazným optickým zkreslením, vpravo obrázek s korekcí zkreslení, převzato z [24]

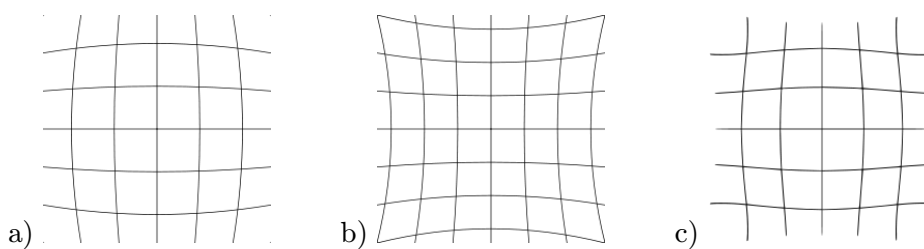
Zkreslením jsou postiženy nejvíce širokoúhlé objektivy a tzv. zoomy, u kterých se na krátkých ohniskových vzdálenostech projevuje převážně zkreslení soudkovité. Aproximace zkreslení se provádí polynomem sudého stupně.

Zkreslení lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

- **Radiální zkreslení**

Se nejvíce projevuje v oblasti okrajů obrázku. Dle vzniklých deformací, jak je znázorňováno na obrázku 2.12, je možné jej rozdělit na zkreslení:

- **soudkovité** deformace se projevuje vypoulením obrazu a klesá se vzdáleností od optické osy
- **poduškovité** deformace se projevuje vklíněním obrazu a vzrůstá se vzdáleností od optické osy
- kombinace soudkovitého a poduškovitého



Obrázek 2.12: Ukázka variant radiálního zkreslení objektivu: a) Soudkovité, b) poduškovité, c) kombinace soudkovitého a poduškovitého

Ve výrazu 2.8 jsou (x,y) původní souřadnice bodu v obraze bez korekce zkreslení, souřadnice (x_{undist}, y_{undist}) udávají novou polohu bodu po korekci a r definuje rádius. Parametry k_1 , k_2 a k_3 jsou získány vyrovnáním.

$$\begin{aligned} x_{undist} &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_{undist} &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \quad (2.8)$$

- **Tangenciální zkreslení**

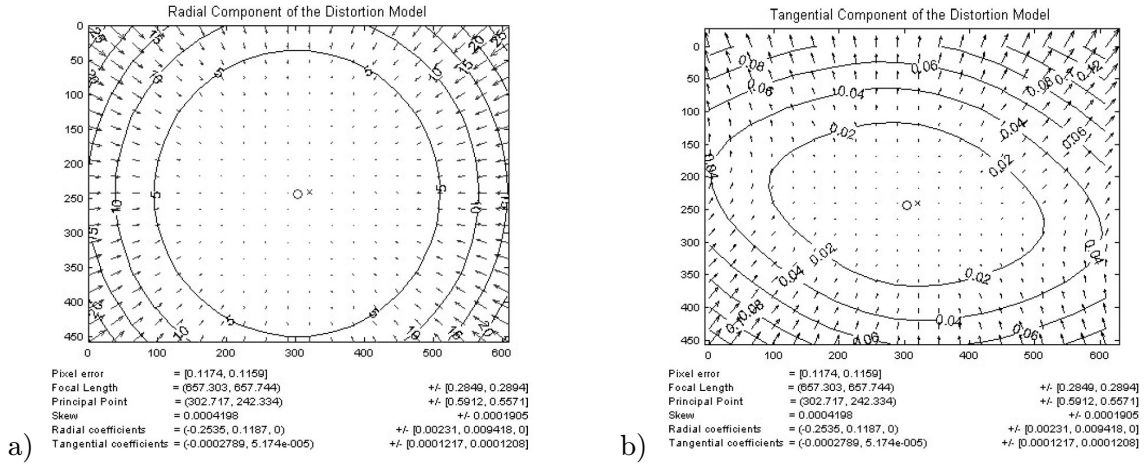
Se projevuje řádově méně. Převážně ve směru kolmém na zkreslení radiální. Jeho hodnoty bývají tak malé, že se v určitých případech dají zanedbat.

I v tomto případě ve výrazu 2.9 definuje r radius, (x, y) jsou původní souřadnice bodu v obraze bez korekce zkreslení a souřadnice (x_{undist}, y_{undist}) udávají novou polohu bodu po korekci. Parametry p_1 a p_2 jsou získány opět vyrovnáním.

$$\begin{aligned} x_{undist} &= x + [2p_1y + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_{undist} &= y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2x] \end{aligned} \quad (2.9)$$

V obou případech je možné radius vypočítat pomocí vzorce 2.10.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.10)$$

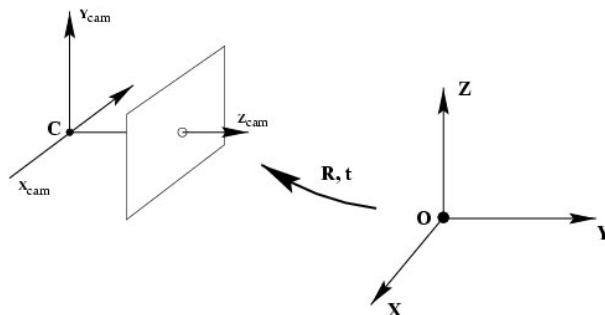


Obrázek 2.13: Ukázka typů zkreslení objektivu, převzato z [8]: a) Radiální zkreslení, b) Tangenciální zkreslení

2.4.4 Vnější parametry kamery

Lze označit také jako vnější kalibrační parametry (R, \vec{t}) , které popisují polohu středu fotoaparátu t a jeho natočení R v rámci pohledu do scény.

Jak je vidět na obrázku 2.14, souřadné systémy (světový souřadný systém a souřadný systém kamery) jsou propojeny pomocí parametrů rotace a posuvu.



Obrázek 2.14: Vnější parametry kamery, převzato z [12]

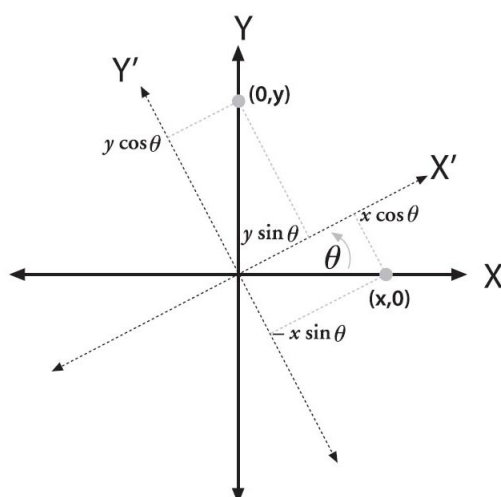
Rotace v prostoru dle jednotlivých os je dána maticemi:

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Grafické znázornění rotace je zobrazeno na obrázku 2.15. Kde X a Y udávají polohu před rotací, X' a Y' naznačují rotaci v daném směru.



Obrázek 2.15: Rotace bodů kolem osy Z pod úhlem θ , převzato a upraveno z [7]

Translace je definována translačním vektorem \vec{t} , který popisuje polohu optického středu fotoaparátu v souřadném systému scény vůči počátku tohoto souřadného systému.

$$\vec{t} = (t_x, t_y, t_z) \quad (2.14)$$

2.5 Projekční matice

Slouží k přepočtu souřadnic snímaného bodu X ve 3D do souřadnic bodu x v rovině obrazu. Tento vztah lze zapsat:

$$x = XP \quad (2.15)$$

Není-li k dispozici kalibrační matice kamery, jedná se o tzv. nekalibrovanou projekční matici P , kterou lze zapsat:

$$P = K[R|t] \quad (2.16)$$

kde R definuje rotaci, t translaci a K je matice vnitřních parametrů. Je-li kalibrační matice kamery známá, lze vztah 2.15 zapsat:

$$\hat{x} = [R|t]X \quad (2.17)$$

kde $\hat{x} = K^{-1}x$ je normalizovaný bod x a $K^{-1}P = [R|t]$ lze nazvat jako normalizovanou projekční matici kamery.

2.6 Epipolární geometrie

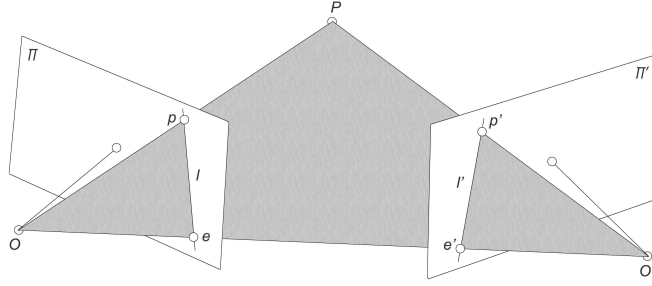
Tato sekce je věnována ne příliš známému odvětví matematiky a to epipolární geometrii. Pro snadnější pochopení zde bude vysvětleno několik základních pojmů a jejich uplatnění při výpočtech.

Máme-li k dispozici dva pohledy do jedné scény, na kterých je zaznamenán dostatečný počet totožných objektů, lze s využitím epipolární geometrie dopočítat prostorové informace které jsou důležité pro rekonstrukci 3D scény.

Epipolární geometrie je nezávislá na rozložení scény. Závisí pouze na relativní pozici kamer, kterými byly jednotlivé snímky dané scény vytvořeny a jejich vnitřních parametrech. Dvojici snímků lze vytvořit jednou, či dvěma kamerami. V obou případech se jedná o geometricky rovnocenné varianty. Díky epipolární geometrii není nutné pro nalezení korespondencí bodů prohledávat celý obrázek. Víme, že poloha korespondujícího bodu leží na tzv. epipolární přímce, která se nachází v místech průniku epipolární roviny s rovinou obrázku.

Zaznamenané pohledy do scény na fotografii se řídí pravidly perspektivní projekce. Zpracovávat lze jak virtuální scénu nasimulovanou v počítači, tak reálnou scénu zobrazenou na fotografii, nebo snímku videa. Pro praktické využití bývá častější zpracovávání právě reálné scény. Záznamy virtuální scény jsou vhodné pro výpočet ukázkových příkladů, či pro porovnání výsledků jednotlivých metod.

Na obrázku 2.16 je znázorněn bod P , který je zaznamenáván z dvou různých pozic pomocí dvou fotoaparátů s optickými středy O a O' . Body p a p' jsou projekce zaznamenaného bodu P . Body e a e' se nazývají epipóly a jsou umístěny na rovinách snímků Π



Obrázek 2.16: Epipolární geometrie dvou pohledů, převzato z [8]

a Π' . Spojnice bodu p a e je tzv. epipolární přímka značená l . Stejně tak v případě bodu p' a e' je epipolární přímka l' .

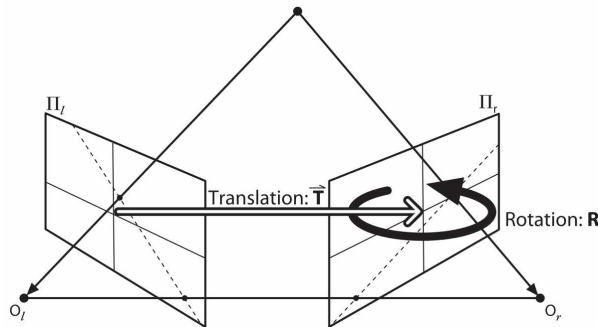
Přesněji epipól e je projekcí optického středu pravé kamery O' , resp. epipól e' je projekcí optického středu levé kamery O . Na jednotlivých obrazových rovinách je bod P pouze zobrazen. Jeho vzdálenost známá není. To znamená, že bod P se může nacházet kdekoli na polopřímce procházející body o a p za obrazovou rovinou Π procházející body o' a p' za obrazovou rovinou Π' . Projekce těchto polopřímek na opačných rovinách obrazu jsou epipolární přímky uvedené výše. Polohu epipólu lze vypočítat jako průsečík epipolárních přímek, které jsou definovány vztahem pro první a druhý obrázek následovně:

$$\begin{aligned} l_i &= F^T p'_i \\ l'_i &= F p_i \end{aligned} \quad (2.18)$$

kde l_i , resp. l'_i je i -tá epipolára prvního, resp. druhého obrázku. p_i a p'_i jsou i -té body prvního a druhého obrázku. F vyjadřuje fundamentální matici.

Esenciální a Fundamentální matice

Esenciální matice je matice 3×3 a obsahuje informace o translaci T a rotaci kamer R v prostoru, jak je znázorněno na obrázku 2.17. Jedná se o geometrické informace, popisující polohu a natočení druhé kamery v prostoru ve vztahu k první. Neobsahuje informace o obzrcích.



Obrázek 2.17: Grafická reprezentace vlastnosti dvou pohledů, převzato z [7]

Esenciální matici E lze vyjádřit vztahem:

$$p_r^T E p_l = 0 \quad (2.19)$$

kde p_l a p_r jsou normalizované souřadnice bodu P .

Fundamentální matice je matice o rozměrech 3×3 a obsahuje totožné informace jako matice esenciální rozšířená o vnitřní parametry kamer.

$$F = K^{-T} E K^{-1} \quad (2.20)$$

kde K je kalibrační matice 2.6. Fundamentální matici F lze vyjádřit vztahem:

$$q_r^T F q_l = 0 \quad (2.21)$$

kde q_r a q_l jsou projekce korespondujících si bodů v obrazové rovině.

Kapitola 3

Aplikace fotogrammetrie v praxi

Tato kapitola je zaměřená na praktické využití fotogrammetrického zpracování obrazu převážně na fotodokumentaci dopravních nehod a jiných dopravních situací. V případě soudního jednání bývá tato dokumentace zkoumána soudními znalci z oboru dopravy i s několikaletým odstupem, což může být problém.

Úkolem soudních znalců je objektivní vyjádření ke skutečnostem a průběhu dopravní nehody. Mají-li soudní znalci k dispozici vhodné vybavení, mohou provést přesné měření geometrického uspořádání místa dopravní nehody metodou geodetického zaměření totální stanicí. Zvláště důležité je znát přesné rozmístění a jednotlivé vzdálenosti zkoumaných objektů jako je například poloha dopravního značení, podélný a příčný sklon vozovky, šířka vozovky, okolní prostředí včetně objektů omezujících výhled a podobně. Dále je důležité znát konečnou polohu vozidel, nalezených stop a často i důležitých objektů, které nebyly z nějakého důvodu zaznamenány.

Pokud naměřené hodnoty a data z dokumentace souhlasí, je možné je spojit a vytvořit virtuální scénu s přesnou pozicí jednotlivých objektů. V případě, že hodnoty nesouhlasí, je náročné, někdy i nemožné uspokojivě určit polohu zdokumentovaných objektů. Až sedm případů z deseti vykazuje odchylku min 30 cm od reálných hodnot [13]. Což může vést až k markantnímu snížení použitelných důkazů. Právě proto bývá při zpracovávání fotodokumentace využíván speciální software, kterému je věnována sekce 3.1. Vzhledem k pořizovacím nákladům tohoto softwaru, bývají využívány i jiné metody a dostupnější prostředky kterým je věnována sekce 3.2.

3.1 Software využívaný v oblasti dopravy

S rozvojem informačních technologií dochází i k rozvoji softwarových nástrojů, které nám umožňují zpracování digitálních dat. Díky rychlému vývoji hardwaru je také možné provádět nad těmito daty různé simulace a výpočty, které nebyly v minulosti možné. Většina těchto programů je navržena tak, aby bylo možné realizovat i náročné výpočty na tzv. domácích počítačích.

Níže je uvedeno několik programů, které pouze částečně mapují aktuální situaci využívaného softwaru, patří však mezi nejznámější. Tyto programy využívají mimo fotogrammetrii mnoho jiných metod, pro tvorbu simulací. Zohledněny jsou fyzikální zákony, vlastnosti materiálů, deformační zóny, vlivy počasí a podobně.

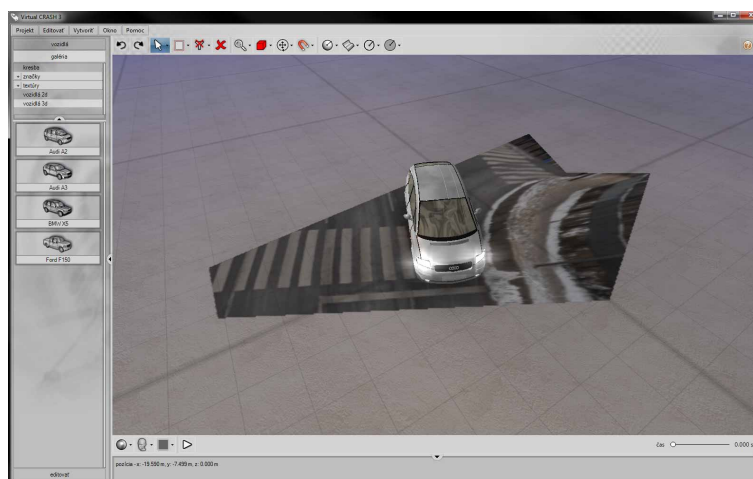
Virtual Crash

Je program určený k vytváření simulací dopravních nehod. Umožňuje realizovat i komplexnější výpočty v reálném čase a disponuje zobrazením jak ve 2D plánech v měřítku, tak i 3D perspektivních pohledech.

Jednou z jeho funkcí je rektifikace obrazu dle rektifikačního vzoru. Práce v tomto programu není složitá. Prostředí je víceméně intuitivní a graficky příjemné 3.2. Program využívá ke svým výpočtům fyzikální zákony, díky kterým jsou výsledky výpočtů přesné. Pomocí simulace je možné dle dostupných informací nasimulovat jednotlivé etapy dané nehody a vytvořit její animaci. I přes vyspělost použitých metod existují případy, kdy není možné stoprocentně průběh nehody potvrdit, nebo vyvrátit. Ale ve většině případů toho dosáhnout lze. A to je důvod, proč je tento program využíván v oblasti znaleckých posudků. Jednou z nevýhod tohoto programu je pořizovací cena.



Obrázek 3.1: Obrázek před zpracováním ve Virtual Crachi 3.0



Obrázek 3.2: Výsledný rektifikovaný obrázek uvedený výše s modelovým autem pro porovnání reálných vzdáleností

PolCAM

Je víceúčelový systém. V ČR je využíván především dopravní policií. Pracuje s videozáznamem, na kterém je zaznamenán průběh sledování vozidla.

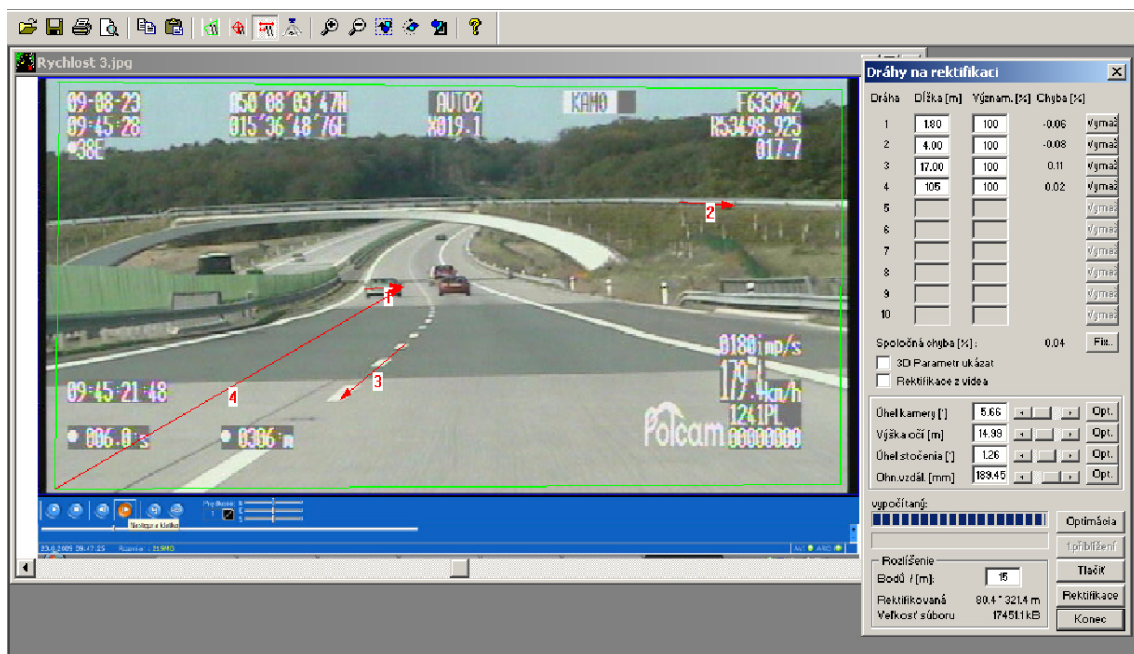
Princip měření spočívá v porovnání rychlostí sledovaného a policejního vozidla. Měření započne v době, kdy policejní vozidlo srovná rychlost se sledovaným vozidlem. Toto měření musí probíhat po určitou dobu, aby bylo možné změřené údaje prakticky využít.

Celý systém se v základní podobě skládá z kamery s optickým zoomem umožňující barevný záznam, centrální jednotky, dálkového ovladače, 7" LCD displeje, digitálního diktafonu s výměnným pevným diskem a mikrofону 3.3. Jako rozšiřující zařízení je nabízen radar pro měření rychlosti (talker Dual SL, Decatur Genesis II Zvolte, Iskra 1), zadní radarová anténa (Stalker Dual SL, Decatur Genesis II Select), GPS anténa, laserový měřič rychlosti, další miniaturní kamery, bezdrátový mikrofón a mnohé další. Jak je uvedeno na stránkách výrobce [3].



Obrázek 3.3: V levé části obrázku je dálkový ovladač, vpravo nahoře detail displeje a vpravo dole kamera na palubní desce. Převzato a upraveno z [3]

Jak je vidět na obrázku 3.4 dle ručně zadaných bodů v obraze, je možné vypočítat chybějící rozměr. Známé rozměry jsou vyznačeny body č.1 až č.3, přičemž č.4 označuje vzdálenost, která bude dopočítána. Vzdálenost č.1 určuje šířku auta (1,8 m), č.2 udává vzdálenost svodidel na mostě (4,0 m) a č.3 definuje vzdálenost přerušovaného vodorovného značení na silnici (17 m). Dané objekty v obraze nebyly zvoleny náhodně. Rozměry dopravního značení a rozměry objektů vymezujících komunikaci jsou stanoveny zákonem.

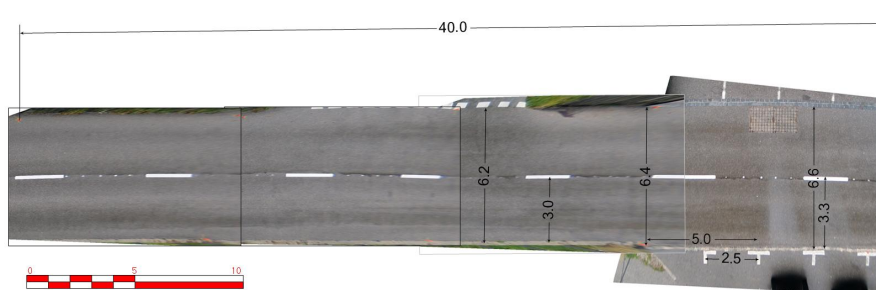


Obrázek 3.4: PolCam EC-II převzato z [4]

PC Rect

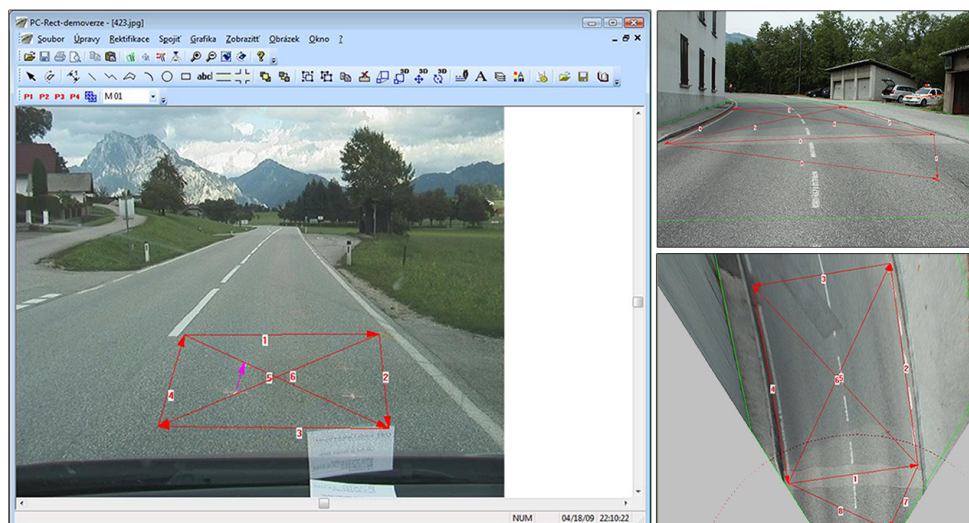
PC Rect [2] je program určený pro rektifikaci fotografií (formátů gif, jpeg, pcs, eps, photo CD) a videí (formátu avi). Rektifikace je proces převedu fotografie na plánek v přesném měřítku, což umožňuje měřit libovolné vzdálenosti na obrázku. Plánek je dále možné využít v programu PC Crash a následně je možné vytvářet simulace dopravních situací. Při zpracování videa musí být video převedeno na sérii očíslovaných snímků, které jsou postupně provázány s místem a plánkem.

Při zpracování videa tímto programem je možné vytvořit model scény, zaznamenané na videozáznamu. Jak je znázorněno na obrázku 3.5. Jednou z variant jak toho dosáhnout, je viditelné umístění rektifikačního kříže na prvním snímku, nebo ruční rektifikací prvního snímku, a všechny další snímky videa se automaticky propojí.



Obrázek 3.5: Ukázka výstupu video rektifikace, převzato a upraveno z [2]

Níže je ukázka uživatelského rozhraní programu s ukázkou rektifikace.



Obrázek 3.6: Uživatelské rozhraní programu PC Rect, vpravo ukázka rektifikovaného obrázku. Převzato a upraveno z [2]

Program si umí automaticky načíst informace z fotografie (tzv. exif informace). Jedná se především o informace, ze kterých je možné vyčíst typ použitého fotoaparátu, čas pořízení fotografie, nastavení clony, ohniskové vzdálenosti a podobně. Tyto informace jsou použity pro správný převod obrázku tak, aby bylo zamezeno zkreslení a nedošlo ke změně poměru stran dle měřítka.

Program jsem si osobně nevyzkoušela, ale reference na něj jsou dobré a již několik let je tento program využíván při vytváření znaleckých posudků dopravních nehod. Jedná se o náročný program, který vyžaduje vysoký výkon počítače na kterém je provozován. Navzdory tomu je dostupná i odlehčená verze pro PDA. Podpora operačních systémů se zužuje převážně na systémy Windows XP a Windows 7.

3.2 Metody využívané pro zpracování fotodokumentace

Ne vždy je možné využít výše uvedený software ať už z jakéhokoli důvodu. Proto jsou využívány i jiné metody, kterým je věnována tato sekce.

Při analýze dopravních nehod je vhodné mít k dispozici i mapové podklady, díky kterým je možné prostorově začlenit dané místo. Jedním z hlavních vydavatelů státem garantovaných a pravidelně aktualizovaných map je Resort Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK) [14]. Krom katastrálních a topografických map vznikají i další geografické podklady jako jsou ortofoto či topografické databáze, které mohou být využity jako základ polohopisných a výškových poměrů.

V následujícím příkladě je naznačen postup, jakým je dokumentace zpracovávána. Příklad byl uveden ve sborníku mezinárodní konference analytiků dopravních nehod [13], která se konala v červnu 2011.

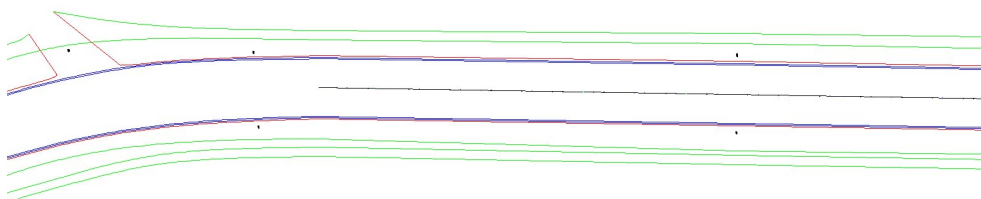
Fotogrammetrické zpracování fotodokumentace

V příkladu je zpracována reálná nehoda, při které došlo k smrtelnému zranění. Pro zachování anonymity zde nebudou uvedeny jakékoli podrobnosti o účastnících, místě ani času. Díky dostatečné fotografické dokumentaci bylo možné s využitím fotogrammetrie získat potřebné podklady pro analytické řešení.



Obrázek 3.7: Místo dopravní nehody, převzato z [13]

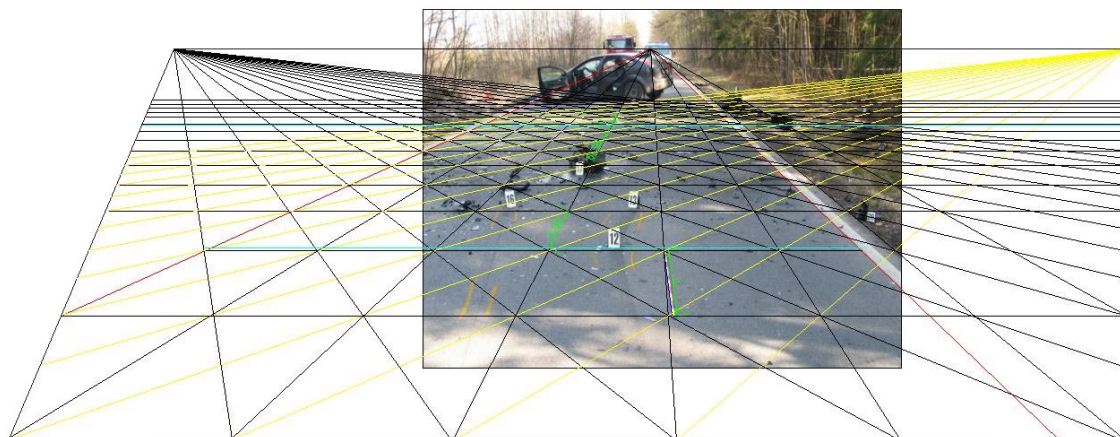
V případě této dopravní nehody bylo provedeno dodatečné geodetické měření místa nehody znázorněného na obrázku 3.8. To by nebylo možné v případě, že by na daném místě došlo k rozsáhlým změnám. Pro zachování poloh dílčích stop dle fotografické dokumentace bylo měření provedeno ve výroční den a hodinu, kdy byla fotodokumentace pořízena.



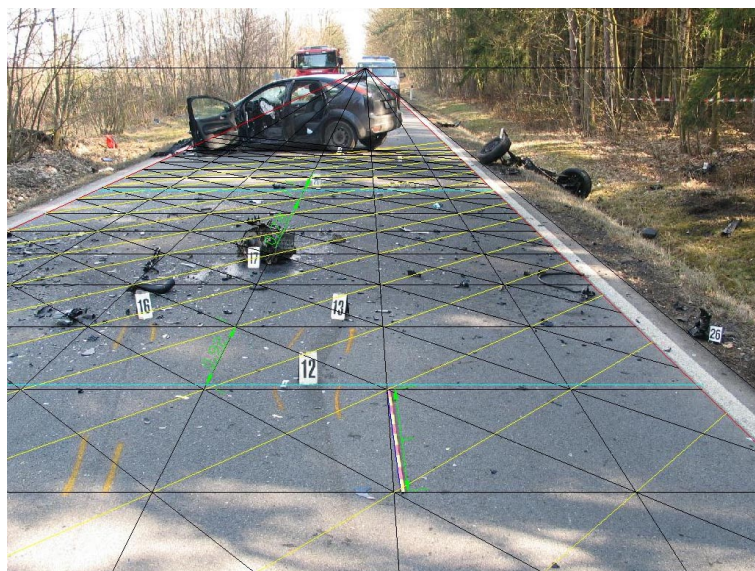
Obrázek 3.8: Geodeticky zaměřené místo dopravní nehody, převzato z [13]

Na snímek 3.7 byla aplikována jednoduchá metoda jednosnímkové fotogrammetrie. Na fotografii je zaznamenáno předpokládané místo střetu a náhodně umístěná měřičská tyč, díky které bylo možné určit parametr pro perspektivní zkreslení fotografie.

Pomocí grafického programu, popřípadě ručně, se do obrázku zakreslí síť, jak je vidět na obrázku 3.9. Určí se dvě ohniska a celý projekt se zvětší, či zmenší dle základních a známých vzdáleností. Vzniklá síť umožňuje takřka neomezené měření. Omezení spočívá v tom, že je možné měřit pouze stopy ležící na vozovce. Měření je tedy umožněno pouze ve 2D. Aby bylo možné měřit i ve 3D, bylo by nutné odečtení tzv. zetového zkreslení.



Obrázek 3.9: Grafické řešení jednosnímkové fotogrammetrie s využitím Autodesk AutoCadu pro vytvoření sítě [13]



Obrázek 3.10: Finálně upravená fotografie s využitím jednosnímkové fotogrammetrie, převzato [13]

Díky nepřesnému policejnímu plánu bylo potřeba nalézt a zakreslit přesná místa viditelných stop na vozovce (zvýrazněné žlutými čarami) a stop obou automobilů. V tomto případě byla využita metoda digitální vícesnímkové fotogrammetrie.

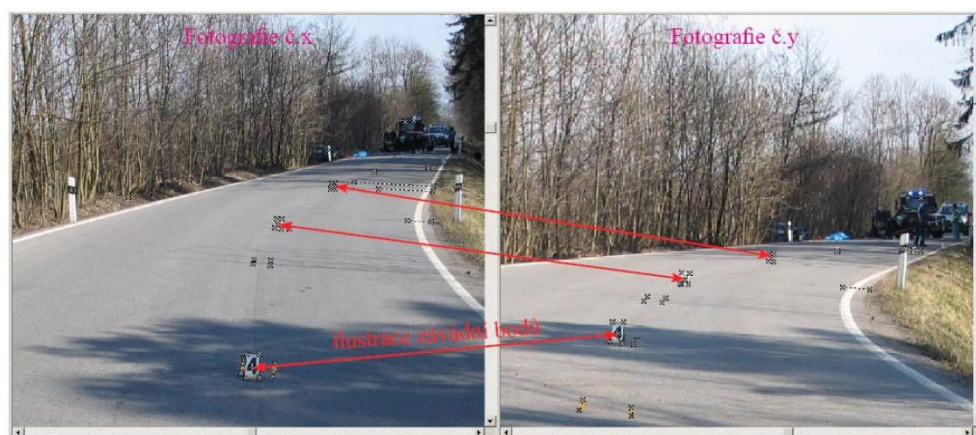
Pro zpracování fotografií formátu JPEG z datového CD ve spise¹ byl využit speciální program² využívající principů vícesnímkové fotogrammetrie. V programu bylo nutné zadat informace o fotoaparátu a objektivu. Tato data byla získány z metadat obrázku³. V případě, že byl oproti jiným fotografiím při fotografování použitý zoom, program uživatele

¹Předpokládá se, že se jedná o data, která nebyla nijak upravena a byla zaznamenána např. Policií ČR

²Program nebyl autorem blíže specifikován

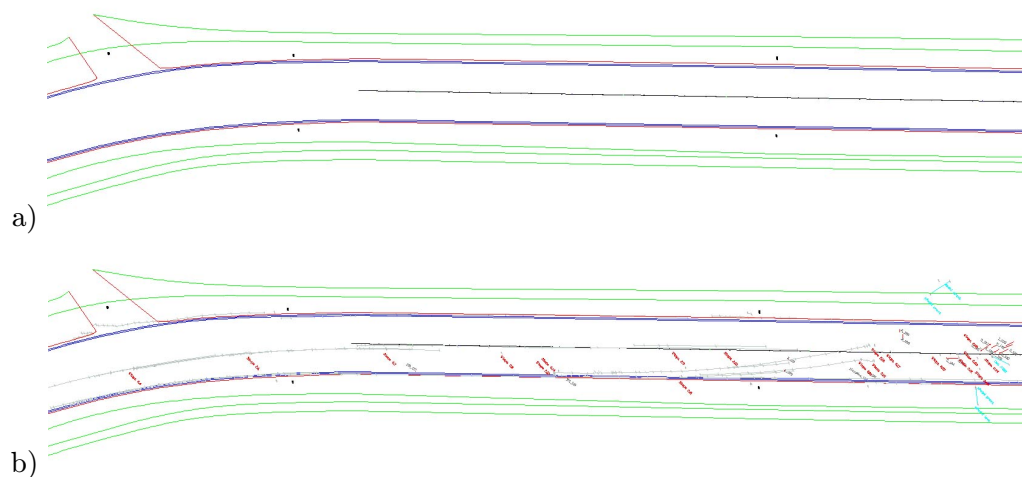
³Jedná se o tzv. EXIF (Exchangeable image file format)

upozornil a bylo nutné upravit informace o ohniskové vzdálenosti. Dalším krokem bylo zadání korespondujících bodů na všech fotografiích. Požadavkem bylo zadat minimálně tři korespondující výskyty jednoho bodu v rámci tří fotografií. Postup je naznačen na obrázku 3.11. Výsledkem celého procesu je scéna s jednotlivými body v rámci jednoho souřadného systému 3.12. Součástí výstupu je tabulka chybovosti bodů a jejich celková odchylka.



Obrázek 3.11: Korespondence bodů na dvou fotografiích, převzato z [13]

Díky tomuto postupu bylo možné scénu místa dopravní nehody zrekonstruovat a dále zpracovávat získaná data v dalších znaleckých programech, ve kterých bylo možné provádět dynamické výpočty potřebné pro analýzu dopravní nehody.



Obrázek 3.12: Model místa dopravní nehody, převzato z [13]: a) Místo dopravní nehody zpracované na základě geodetického měření, b) Model s geodetickými daty a daty získanými pomocí fotogrammetrické analýzy

Pomocí vypočítaných informací bylo možné s využitím stejných parametrů nastavených na fotoaparátu pořídit nové fotografie místa nehody i s časovým odstupem.

Souhrn	
Celkový počet vyznačených bodů	498
Celkový počet fotografií	59
Minimální počet označení bodu na fotografiích	3
Celkový čas	10 hodin

3.3 Využití vozidlových kamer

Relativně novým, leč významným prostředkem jak zaznamenat dopravní situaci je využití vozidlových kamer. Aktuálně dostupné kamery jsou pro názornost zobrazeny na obrázku 3.13. Díky nim je možné zaznamenat průběh dopravní situace popřípadě dopravní nehody. Tyto záznamy umožňují přesné simulace a popis dané situace, který mnohdy usnadňuje šetření.

Princip zpracování je založen na metrické analýze videa. Přesněji se jedná o využití fotogrammetrických metod aplikovaných na jednotlivé snímky videozáznamu. Lze měřit rychlost vozidla, jednotlivé vzdálenosti, dobu příčného přemístění vozidla, polohu jednotlivých objektů a podobně.

Existují testy přesnosti měření, které ukazují, že záznamy z kamer jsou dostatečně vhodné pro využití při analýze dopravní nehody [13]. Přesto je však nutné při využití videozáznamu zohlednit právní hledisko a je nezbytné počítat s jistými komplikacemi, při jeho využití jaké důkazního materiálu.

Na trhu je dostupných několik typů kamer lišících se kvalitou a převážně cenou. Při výběru je dobré zohlednit rozlišení kamery, frekvence snímání, formát záznamu, kapacitu úložného prostoru, pozorovací úhel, velikost a kvalitu displeje a podobně. Dostupné jsou i kamery s nočním viděním.

Nainstalovanou kameru ve vozidle je možné automaticky spustit při nastartování vozidla. Některé typy kamer se mohou aktivovat i při detekování pohybu objektu před kamerou. Kamery bývají napájeny pomocí vestavěné baterie či ze zásuvky zapalovače 12/24 V. Většina kamer je schopna zaznamenávat i zvuk. Nedílnou součástí je zaznamenávání nastaveného času a data. Dražší kamery mohou být vybaveny laserovým zaměřovačem, GPS lokátorem, detekcí pohybu, širšími možnostmi nastavení s ohledem na světelné podmínky atd.



Obrázek 3.13: Ukázka kamer využívaných v dopravě, převzato a upraveno z [13]

Kamery bývají umístěny nejčastěji do horního okraje čelního skla v místech uchycení zpětného zrcátka (výhodou je tónovaný okraj okna), jak je vidět na obrázku 3.14, nebo na přístrojové desce. Objektiv kamery nemusí být umístěn přímo na skle, i při vzdálenosti 10 cm od skla nevznikají odlesky, či jiné nežádoucí jevy. Umístění kamery nespadá pod žádný zvláštní předpis, je však dobré dodržovat stejné zásady vydané ministerstvem

dopravy pro umístění navigací nebo dálničních známek.



Obrázek 3.14: Umístění videokamery na čelním skle v oblasti zpětného zrcátka, převzato z [13]

Při zpracovávání záznamu je přesnost analýzy závislá na jeho kvalitě a přesnosti vstupních dat. Z videozáznamů lze získat mnoho cenných informací, níže je uvedeno několik z nich.

Počet snímku a čas pohybu

Z parametrů kamery není problém zjistit frekvenci snímání, která určuje počet zaznamenaných snímků za sekundu. Pomocí tohoto parametru je možné vypočítat dle vzorečku 3.1 čas, který uplyne mezi dvěma po sobě jdoucími snímky, resp. dobu, která uplyne za dobu snímání n snímků [13]. Kde n je počet snímků a f značí frekvenci snímání.

$$\Delta t = \frac{n}{f} \quad (3.1)$$

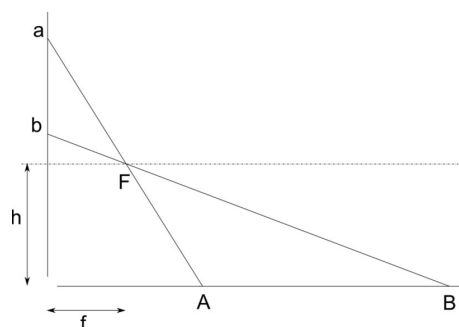
Při výpočtech je nutné zohlednit i **chybu snímání**. Tato chyba vzniká ukládáním stejných snímků za sebou na úkor snímku, který není pořízen. Například při pořízení druhého snímku se místo třetího opět použije snímek druhý. Díky této nepravidelnosti mohou vznikat problémy, které však jak praxe ukazuje nejsou velkou překážkou.

Metoda je využívána například pro výpočet doby pohybu chodce od vstupu do vozovky, po místo střetu s vozidlem, dobu pohybu vozidla vyjíždějícího z vedlejší silnice příčně do křižovatky a podobně.

Geometrická analýza obrazu

Podrobně se tomuto tématu věnuje Albert Bradáč ve své práci [9], zjednodušeně se jedná o analýzu vztahů mezi snímanými předměty a jejich obrazem, které znázorňuje obrázek 3.15.

Kamera je umístěna do výšky h . Body A a B na předmětové rovině (rovnoběžné s vozovkou) jsou promítány na obrazovou rovinu (kolmou na předmětovou rovinu). F je ohnisko



Obrázek 3.15: Zobrazení předmětové roviny do roviny obrazu, převzato z [13]

a f značí ohniskovou vzdálenost kamery. Pro jednoduchost se předpokládá, že úhel záběru je 0° .

S využitím podobnosti trojúhelníků lze odvodit vztah 3.2.

$$\frac{L_A}{h} = \frac{f}{l_a} \quad (3.2)$$

po úpravě

$$L_A l_a = f h \quad (3.3)$$

Jelikož jsou hodnoty f a h konstantní, lze je nahradit konstantou k_o .

$$L_B = \frac{k_o}{l_b} \quad (3.4)$$

Je-li zvolen bod v obrazové rovině, resp. v rovině vozovky, lze vzdálenost tohoto bodu od ohniskové roviny, resp. od kamery, vypočítat dle vztahu 3.4. Kde l_b je vzdálenost bodu B v obrazové rovině od úběžníku.

I tato metoda má svá omezení. Konstrukce jsou založeny na předpokladu, že vozovka má tvar roviny. V takové případě jsou výsledky měření přesné. Je-li vozovka v měřených místech nakloněná, nebo zakřivená a není možné na fotografii nalézt jiné body pro vytvoření snímkového úběžníku, není tuto metodu možné použít.

Využití této metody má své uplatnění při hledání vzdáleností překážek na vozovce, zjišťování podélné vzdálenosti vozidel a podobně. Existuje-li bod zaznamenaný na více snímcích jdoucích po sobě, je možné díky jeho poloze určit i rychlost vozidla.

Přínos využití kamer ve vozidlech

Videozáznam je neocenitelným podkladem pro analýzu dopravních nehod. Veřejností však bývá vnímán spíše negativně. Oproti tomu zájem pojišťoven roste. A za jistých podmínek by mohlo být využívání kamer ve vozidlech pojišťovnami opláceno klientů jistými výhodami.

Nelze s jistotou říct, zda by rozšíření kamer ovlivnilo nehodovost, či ukázněnost řidičů. Je však možné předpokládat snížení počtu soudních sporů o zavinění dopravních nehod.

Z právního hlediska používání kamer ve vozidlech sebou může nést jisté komplikace. Zvláště v oblasti ochrany soukromí účastníků silničního provozu především s možným zásahem do jejich osobnostních práv dle § 11 a násl. zákona č. 40/ 1964 Sb., občanský zákoník, ve

znění pozdějších předpisů (dále jen OZ).⁴

Vzhledem ke skutečnosti, že pořízování záběrů vozidlovou kamerou neumožní identifikovat přímo či nepřímo snímané subjekty, se v tomto případě o zásah do osobnostních práv snímaných subjektů dle § 11 a násl. OZ jednat nebude.

Dle současné praxe není zaznamenání registrační značky vozidla v rozporu se zákonem č. 101/2000 Sb., o ochraně osobních údajů a o změně některých zákonů.

V případě, kdy by ovšem došlo jednáním osoby, která si vozidlovou kameru na svém voze nainstalovala, k zachycení podoby fyzické osoby, v našem případě účastníka silničního provozu, nebo pokud by byl zaznamenán jakýkoliv její projev osobní povahy či by bylo možno takovouto osobu zřetelně identifikovat, v tomto případě by došlo k určitému zásahu do osobnostních práv takto zachycené osoby a tento kamerový záznam, který by byl na základě výše uvedeného v rozporu s ochranou osobnosti dle § 11 a násl. OZ, by mohl být soudem odmítnut jako tzv. nepřipustný důkaz.

Avšak ani tehdy, kdy by takový záznam kamery zachycoval projevy osobní povahy jiného účastníka silničního provozu a tak zasahoval do jeho osobnostních práv dle § 11 a násl. OZ, nesmějí soudy tyto kamerové záznamy striktně a automaticky odmítat jako tzv. nepřipustné důkazy pouze z důvodu argumentace možným zásahem do osobnostních práv druhé osoby, neboť v současné době již tato pouhá argumentace nepostačuje k odmítnutí tohoto záznamu jako možného důkazu.

Soudy musí v zájmu zjištění skutečného skutkového stavu provést u takovýchto důkazů tzv. test proporcionality (princip poměřování), tedy nakolik bylo tímto jednáním zasazeno do osobnostních práv účastníka silničního provozu a do jaké míry byla jeho práva tímto jednáním narušena. Soud bude zkoumat především vzájemný poměr těchto práv a v případě, kdy dospěje k závěru, že zájem na zjištění spravedlnosti je vyvážen nepatrným zásahem do osobnostních práv druhého, tento důkaz připustí.

Výše uvedené informace nejen právního charakteru byly uvedeny ve sborníku XVI. mezinárodní konference analytiků dopravních nehod [13].

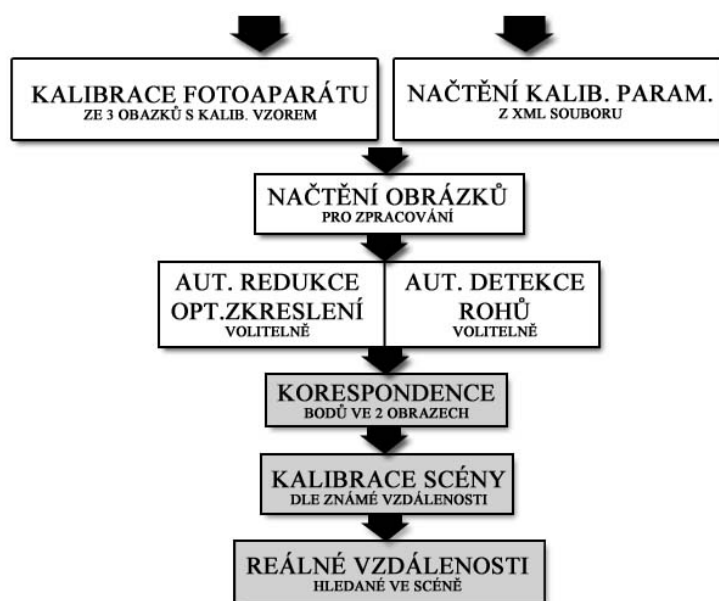
Právní záležitosti týkající se využívání vozidlových kamer zde byly uvedeny proto, aby bylo poukázáno na relevantnost důkazního materiálu. Pokud by vidoedokumentace nebyla vyhodnocena jako adekvátní důkaz, bylo by takřka zbytečné se zabývat a rozvíjet fotogrammetrické metody pro její zpracování.

⁴§ 12 OZ: Písemnosti osobní povahy, podobizny, obrazové snímky a obrazové a zvukové záznamy týkající se fyzické osoby nebo jejích projevů osobní povahy smějí být pořízeny nebo použity jen s jejím svolením.

Kapitola 4

Analýza a návrh

Tato kapitola je věnována analýze a návrhu aplikace, ve kterém byly zohledněny existující postupy a algoritmy věnující se tomuto tématu. Jednotlivé sekce jsou rozděleny dle kroků, které je nutné uskutečnit aby bylo možné ze vstupu vytvořit virtuální model scény ve kterém bude možné vypočítat jednotlivé vzdálenosti zadané uživatelem. V aplikaci je očekávána aktivní spolupráce uživatele. V obrázku 4.1 jsou tyto úkony odlišeny šedým pozadím.



Obrázek 4.1: Schéma návrhu řešení

Motivace

Vzhledem k zaměření aplikace pro zpracování fotodokumentace dopravních nehod jsou v návrhu zohledněny aspekty, které jsou spojeny s reálnými skutečnostmi. Jako jsou například nekvalitní a neodborně pořízené fotografie, na kterých ne vždy bývá zaznamenáno. Cílem návrhu je nalézt nejoptimálnější postup a využít nejvhodnější metody pro nalezení reálné vzdálenosti a rozměry objektů, zobrazených na fotografiích.

4.1 Implementační prostředí

Jako programovací jazyk jsem si zvolila c++ a vzhledem k dostupným prostředkům jsem se rozhodla aplikaci vytvořit v prostředí MS Visual Studio 2008, které je v rámci licence MSDN AA pro studenty Fakulty Informačních Technologií VUT v Brně zdarma k dispozici. Pro práci s obrázky jsem využila volně šiřitelnou knihovnu OpenCV 2.1.

MS Visual Studio

Je produkt společnosti Microsoft. Je určeno pro vývoj softwarových aplikací od návrhu, přes tvorbu, vývoj, testování až po uplatnění v praxi. Vytvořené aplikace je možné provozovat na platformách OS Windows, cloud, na webu i na mobilních nebo embedded zařízeních [5]. Aktuální dostupná verze je MS Visual Studio 2010¹.

OpenCV (Open Source Computer Vision)

Je knihovna určená pro zpracování obrazu a videa v oblasti nejen počítačového vidění. Lze ji využít z prostředí jazyků C, C++, Pythonu a brzy i Javy. Lze ji zprovoznit v operačních systémech Linux, Android, Mac a Windows. Pod BSD licencí je volně využitelná i pro komerční využití. Aktuální dostupná verze je 2.3².

4.2 Kalibrace fotoaparátu

Aby bylo možné využívat obyčejné digitální fotoaparáty a kamery v oblasti fotogrammetrické analýzy, je nutné znát jejich základní parametry.

Kalibraci je možné provést automaticky, pomocí vhodného softwaru například s využitím kalibračních objektů umístěných ve scéně. K dispozici je mnoho metod, jak parametry vypočítat. Ne vždy však musíme dojít k uspokojivým výsledkům. Důvody neúspěchu mohou být různé. Nedostatečná kvalita snímků, nevhodná scéna, či nedostatek informací, které je možné ze scény získat pro výpočet.

Díky kalibraci je možné vytvořit z fotografií 3D virtuální model scény a s využitím vhodných algoritmů je možné vypočítat jednotlivé vzdálenosti a rozměry objektů na fotografiích.

Výstupem kalibrace jsou vnitřní parametry $(\alpha_x, \beta_y, x_0, y_0)$ a zkreslení (3 parametry radiálního k_1, k_2, k_3 , 2 tangenciální p_1, p_2). Tyto parametry jsou dále zpracovány například pro redukci optického zkreslení.

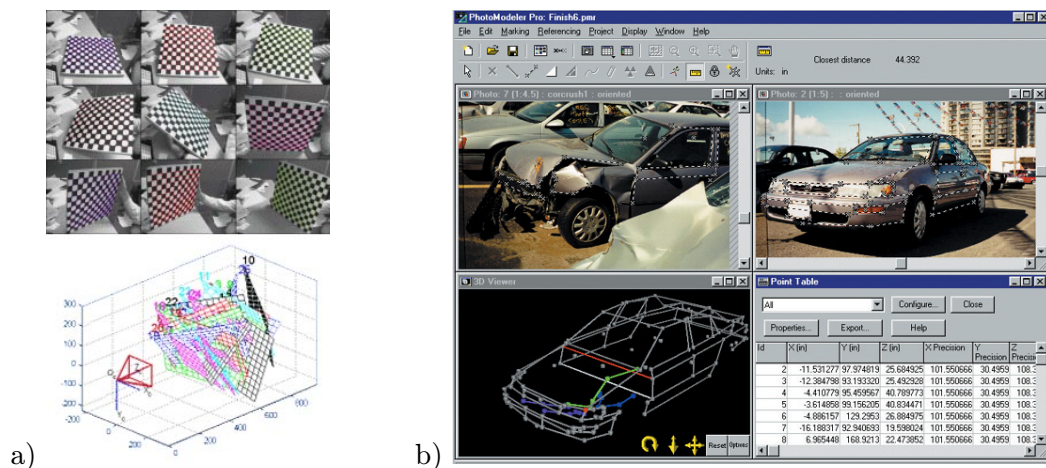
Kalibrace pomocí softwaru

V dnešní době je možné získat mnoho jak komerčních, tak neplacených programů určených ke kalibraci fotoaparátu či kamery. Ve většině případů jsou zpracovávány snímky, na kterých je zobrazena šablona s kalibračním obrazcem, nebo objektem známých rozměrů. Kalibraci lze provést i z jednoho snímku. Obecně ale platí, že čím více kvalitních snímků máme k dispozici, tím přesnějších výsledků lze dosáhnout.

¹Pro červen 2011

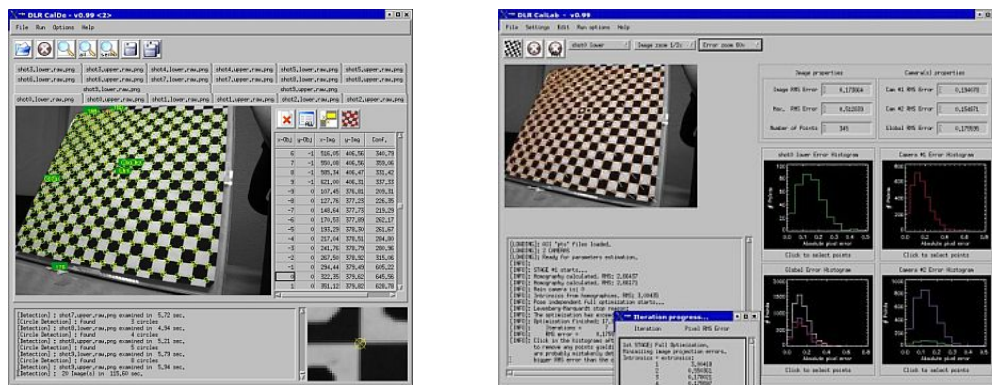
²Pro červen 2011

Mezi zástupce komerčního softwaru patří například Matlab či PhotoModeler. K dnešnímu datu je dostupná verze PhotoModeler 6³. Jedná se o komplexní balíček, který umožňuje mino kalibrace kamery, vytváření 3D modelů, simulaci scén jak dopravních, tak pro kriminalistické účely. Výstupem kalibrace jsou informace o ohnisku, formátu poměru stran, optickém zkreslení a projekčním bodu. Podrobnější informace jsou popsány na stránkách distributora [15].



Obrázek 4.2: Ukázka uživatelského rozhraní softwaru pro kalibraci kamery: a) Matlab, b) PhotoModeler, převzato z [18]

Zástupcem volně dostupného softwaru pro kalibraci kamery je DLR CalDe a DLR CalLab. Jak již název napovídá, jedná se o dva samostatné programy, které navzájem spolupracují. Výstupem těchto programů v konečné fázi je matice vnitřních parametrů.

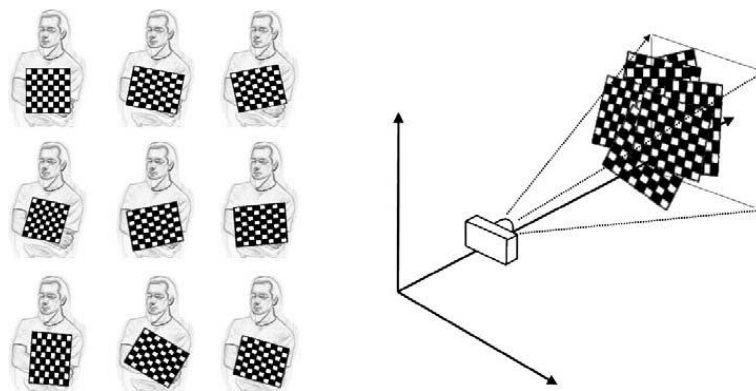


Obrázek 4.3: Ukázka uživatelského rozhraní DLR CalLab a CalDe, převzato z [19]

Kalibrace s využitím OpenCV

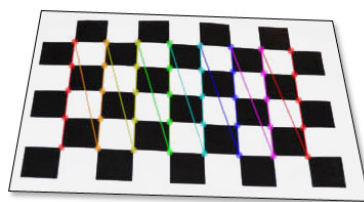
Při kalibraci fotoaparátu pomocí funkcí OpenCV se využívá rovinného vzoru šachovnice. Vstupem jsou min. tři fotografie. Na obrázku 4.4 je zaznamenána šachovnice z různých úhlů, díky kterým je možné fotoaparát či kameru zkalibrovat.

³Červen 2011



Obrázek 4.4: Ukázka zpracování šachovnice, převzato z [7]

Finálním výstupem jsou vnitřní parametry kamery a hodnoty optického zkreslení. Hodnoty mohou být uloženy do souboru formátu XML⁴, který je možné využít při zpracovávání dalších fotografií pořízených stejným fotoaparátem. Podrobněji je postup kalibrace rozebrán v sekci 5.1. Na obrázku 4.5 je znázorněn úspěšně detekovaný vzor šachovnice s vyznačenými rohy.



Obrázek 4.5: Ukázka zvýrazněných a propojených rohů šachovnice na fotografii po provedení kalibrace

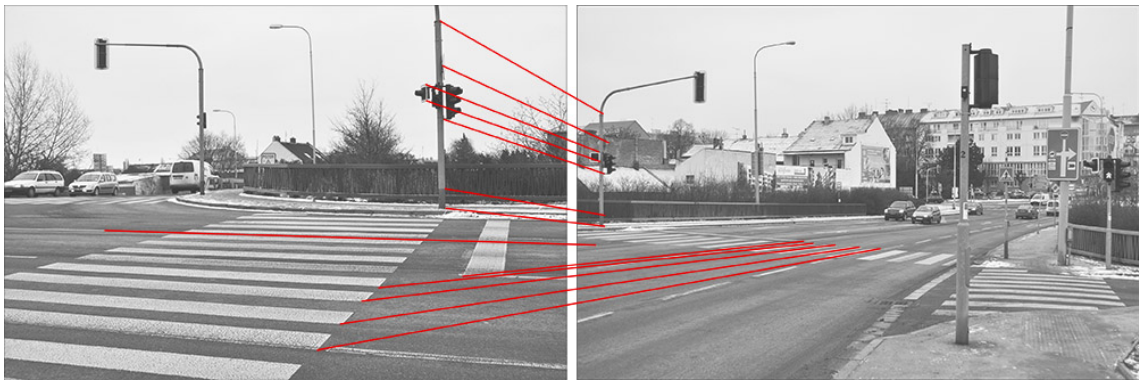
Metoda vybraná pro aplikaci

Jako nejvhodnější pro řešení kalibrace v aplikaci jsem si vybrala využití funkcí OpenCV 2.1. Funkce, které nabízí jsou optimalizované, volně dostupné a dobře zdokumentované. Vzhledem k širokým možnostem využití knihoven OpenCV v oblasti zpracování obrazu, nebude kalibrace kamery jedinou oblastí jejího využití.

4.3 Detekce bodů a jejich korespondence

Přesné zadání korespondujících si bodů na fotografiích je důležité pro přesné výpočty, díky kterým je možné vytvořit virtuální scénu. Existuje mnoho algoritmů, které automaticky body vyhledají. Jejich použití s sebou ne vždy nese uspokojivé výsledky. Zvláště při zpracovávání fotodokumentace dopravních nehod. Kvalita fotografií může být různá. Zaznamenané objekty, zvláště jedná-li se o části dopravních vozidel, mohou být v různých úhlech těžko rozpoznatelné a bez potřebných znalostí je takřka nemožné dané objekty na jednotlivých fotografiích identifikovat. Proto není v mnohých situacích možné využít automatickou detekci klíčových bodů v obraze.

⁴eXtensible Markup Language



Obrázek 4.6: Ukázka korespondence bodů zadaných uživatelem

Klíčové body v obraze

Pro detekci klíčových bodů v obraze je důležité využít vhodný algoritmus. Záleží, co pro nás je v dané situaci výhodné detekovat. V obraze je možné zvýraznit oblasti (dle barvy, jasu, textury, apod.), hrany, rohy, nebo výrazné body v obraze. Zvolené body mohou být následně využívány například pro automatické nalezení korespondencí, určení směru pohybu v obraze, 3D rekonstrukci scény a podobně.

Jedná-li se o ruční zadávání klíčových bodů v obraze, je možné zvýraznit některé rysy obrazu, které detekci bodu mohou usnadnit. Lze využít:

- **Hranové detektory** vyhledávají v obrazech hrany. Hrana je definována jako oblast, kde se prudce mění hodnota jasu a tato změna má konstantní směr gradientu v okolí určité minimální velikosti [21]. Mezi nejznámější hranové detektory patří Cannyho detektor a Sobelův detektor.
- **Rohové detektory** vyhledávají v obrazech rohy. Rohy jsou obecně definované jako průnik hran, nebo jako bod, ve kterém se hrany sbíhají.

Korespondence

Jedná-li se o automatickou detekci korespondujících si bodů, je důležité nalezeným bodům definovat určité vlastnosti, díky kterým by bylo možné tyto body identifikovat i na ostatních obrázcích. K tomuto účelu je možné využít deskriptory. Deskriptory popisují nalezené body vlastnostmi jeho okolí. Metody využívající deskriptory jsou například:

- **SIFT (Scale Invariant Feature Transformation)** je metoda využívaná pro vyhledání korespondencí. Je invariantní vůči změně měřítka, 2D rotaci, změně jasu, kontrastu, osvětlení a šumu. Částečně invariantní je vůči prostorovému úhlu pohledu.
- **SURF (Speeded Up Robust Features)** vychází z algoritmu SIFT. Jeho činnost lze rozdělit do několika částí. Nejdříve jsou vyhledány klíčové body, kterým jsou v další fázi dle jejich okolí vypočítány deskriptory. Je invariantní vůči rotaci a změně měřítka.

Řešení detekce a korespondence bodů v aplikaci

Vzhledem k povaze fotodokumentace dopravních nehod není možné některé výše uvedené metody využít. Nebo by jejich využití nevedlo k uspokojivým výsledkům. Hlavním důvodem

je typ zaznamenané scény, která ne vždy obsahuje prvky, na kterých by mohly být metody zvýraznění objektů, hran či bodů prakticky využity.

Proto se v aplikaci počítá s ručním zadáváním bodů uživatelem. I když při ručním zadávání bodů dochází ke vzniku větších chyb, automatická detekce ve většině případů využít nelze. A ne vždy je automatická detekce pro uživatele přínosná. Proto je umožněno v aplikaci automatickou detekci vypnout.

4.4 Rekonstrukce bodu v prostoru

Souřadnice bodu v prostoru lze vypočítat ze známých parametrů získaných z obrazů. Postup rekonstrukce:

1. Vyhledání významných bodů a vyznačení jejich korespondence
2. Výpočet fundamentální matice F z korespondujících si bodů
3. Určení projekčních matic P a P' viz. 2.5
4. Výpočet souřadnic bodu X v prostoru scény pro každou dvojici korespondujících si bodů x a x' viz. níže.

Rekonstrukce 3D bodu vychází z rovnic korespondujících si bodů $x = PX$ a $x' = P'X$, kde P a P' jsou projekční matice dvou kamer. Tyto rovnice se dají zkombinovat do nové, lineární rovnice pro $AX = 0$, kde A o rozměrech 4×4 lze sestavit následovně:

$$A = \begin{bmatrix} xp_3^T - xp_1^T \\ yp_3^T - yp_1^T \\ x'p_3'^T - p_1'^T \\ y'p_3'^T - p_2'^T \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Rovnici můžeme řešit pomocí SVD rozkladu $A = UWV^T$, kde výsledné souřadnice bodu X nalezneme v posledním sloupci matice V^T .

Metoda SVD

Je tzv. singulární metoda dekompozice (Singular Value Decomposition) sloužící k rozkladu obdelníkových matic o n řádcích a p sloupcích.

SVD teorém zní:

$$A_{n \times p} = U_{n \times n} W_{n \times p} V_{p \times p}^T$$

4.5 Kalibrace scény

Aby bylo možné v aplikaci dopočítat reálné vzdálenosti a rozměry objektů zobrazených na fotografii, je nutné virtuální 3D model scény zkalibrovat. Přesněji, nastavit měřítko dle kterého bude možné rozměrům v pixelech dát reálné rozměry např. v mm.

Obrázky fotodokumentace dopravních nehod často obsahují objekty známých rozměrů, díky kterým je možné virtuální scénu zkalibrovat. Jedná se především o objekty jako je dopravní značení (vodorovné, svislé), RZ⁵ vozidel, různé části vozidel standardizovaných výrobcem, šířka komunikace, svodidel a mnohé jiné. Jak je znázorněno na obrázku 4.7.

⁵RZ je tzv. registrační značka, dříve známá pod pojmem SPZ státní poznávací značka



Obrázek 4.7: Vyznačené objekty standardizovaných rozměrů

Uživatel pouze objekt známých rozměrů na obou fotografiích vyhledá, vyznačí a zadá známý rozměr. Těchto známých vzdáleností je dobré zadat více, aby byl přepoččet přesnější.

4.5.1 Určení vzdáleností a rozměrů objektů na fotografii

Díky zkalibrované scéně je možné s určitou přesností odhadnout vzdálenosti či rozměry objektů zaznamenaných na fotografii. Pro kalibraci scény je nutné v aplikaci vyznačit známou vzdálenost na obou obrázcích, díky které je vypočteno měřítko scény. Toto měřítko je pro zvýšení přesnosti zprůměrováno až ze tří zadaných vzdáleností. Po zkalibrování scény je možné zadat hledanou vzdálenost v obrázcích a výstupem je reálná vzdálenost vypočítaná v metrickém prostoru scény.

Kapitola 5

Implementace

V této sekci jsou popsány jednotlivé kroky implementované v aplikaci pro fotogrammetrickou analýzu obrazů včetně implementačního prostředí, ve kterém byla aplikace vytvořena. Ukázka a popis uživatelského prostředí je popsána v příloze /refsec:GUI.

5.1 Kalibrace pomocí šachovnice

Kalibrace fotoaparátu je v aplikaci realizována pomocí funkcí OpenCV. Na vstupu jsou uživatelem načteny tři fotografie s kalibračním vzorem šachovnice. Jednotlivé fotografie musejí obsahovat různé pohledy do scény na celou šachovnici (viz. obrázek 5.1).

Obrázky je možné načíst kliknutím na položku v menu *Kalibrace* \hookrightarrow *Ze tří obrázků*. Otevře se okno pro výběr fotografií, ve kterém se načtou všechny tři fotografie najednou (buď kliknutím na první a poslední se stisknutou klávesou SHIFT, nebo výběrem jednotlivých fotografií se stisknutou klávesou CTRL).



Obrázek 5.1: Vstupní fotografie se zaznamenanou šachovnicí z různých úhlů

Tyto fotografie slouží jako vstup následujících funkcí.

```
int cvFindChessboardCorners(  
    image,          // zdrojový obrázek s šachovnicí  
    patternSize,    // počet vnitřních rohů šachovnice  
    corners,        // pole detekovaných rohů  
    flags,          // CV_CALIB_CB_ADAPTIVE_THRESH,  
    // CV_CALIB_CB_NORMALIZE_IMAGE,  
    // CV_CALIB_CB_FILTER_QUADS  
)
```

Funkce *cvFindChessboardCorners()* se pokusí v daném obraze nalézt kalibrační vzor šachovnice. Vrací nenulovou hodnotu v případě, že nalezne všechny rohy a to ve správném pořadí (řádek po řádku, zleva doprava v každém řádku). Jinak vrací nulu.

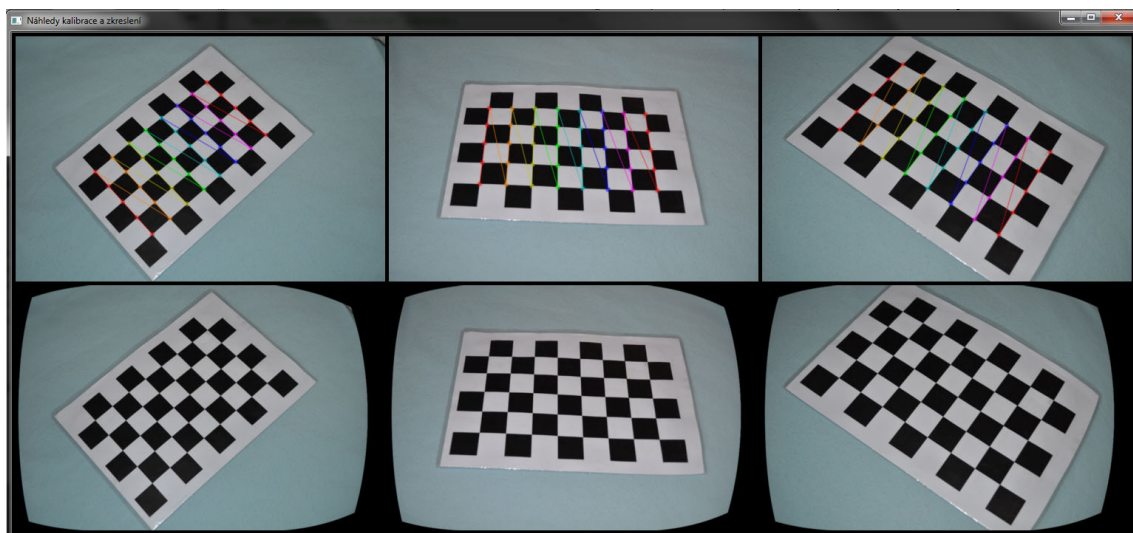
```
cvFindCornerSubPix(
    image,          // vstupní obrázek
    corners,        // souřadnice rohů
    count,          // počet rohu
    win,            // polovina délky hledaného okna
    zero_zone,      // polovina délky hledaného okna
    criteria        // podmínka pro ukončení iterace
)
```

Pro zpřesnění lokalizace nalezených bodů je využita funkce *cvFindCornerSubPix()*. Nalezené body jsou pak pomocí funkce *DrawChessboardCorners()* barevně vykresleny do obrázku. Jak je znázorněno v horní části obrázku 5.2.

```
DrawChessboardCorners(
    image,          // obrázek, ve kterém budou nalezené rohy zvýrazněny
    patternSize,    // počet vnitřních rohů v šachovnici
    corners,        // pole detekovaných rohů
    patternWasFound, // indikuje, zda byla nalezena celá šachovnice, či nikoli
)
```

Výstupem celého procesu je kalibrační matice fotoaparátu obsahující vnitřní parametry a parametry optického zkreslení. Tyto parametry jsou automaticky uloženy do xml souborů, které je možné do aplikace načíst aniž by bylo nutné celý proces kalibrace opakovat.

Díky těmto parametrům je možné na dalších vstupních fotografiích provést korekci zkreslení, které je popsáno v následující sekci.



Obrázek 5.2: Ukázka tří kalibračních fotografií (na obrázku horní trojice) a tří fotografií s korekcí optického zkreslení (na obrázku dolní trojice)

5.2 Redukce optického zkreslení a detekce rohů

Optické zkreslení se může projevit na fotografiích s různou intenzitou. V některých případech je takřka nepostřehnutelné, přesto však lze předpokládat, že při využití korekce optického zkreslení se přesnost při zadávání bodů může zvýšit.

V aplikaci se automatická korekce radiálního zkreslení provede jen tehdy, je-li uživatelem vyžadována. Automatickou korekci lze zapnout, resp. vypnout v menu *Obrázek* \hookrightarrow *Redukovat zkreslení*.

V dolní části obrázku 5.2 je vidět korekce optického zkreslení na vstupních fotografiích použitých při kalibraci.

Redukce optického zkreslení je realizována pomocí funkce:

```
cvInitUndistortMap(  
    intrinsic_matrix,    // kalibrační matice  
    distortion_coeffs,   // parametry opt. zkreslení  
    mapx,                // výsledná korekce bodu v ose x  
    mapy,                // výsledná korekce bodu v ose y  
)
```

Vstupní hodnoty jsou kalibrační matice kamery a parametry optického zkreslení, které byly získány v předchozím kroku. Výstupem je obrázek s korekcí optického zkreslení.

V případě fotodokumentace dopravních nehod se nedá spoléhat na to, že na fotografiích budou zaznamenané objekty s výraznými hranami, rohy či jinými prvky, které by uživateli usnadnily zadávání korespondující. Na obrázku 6.8 je vidět, že v nevhodné scéně jsou nalezené body takřka nepoužitelné pro vyznačení jakékoli korespondence. Pokud uživatel uzná za vhodné, může automatickou detekci rohů před načtením obrázků využít. Automatickou detekci lze zapnout, resp. vypnout v menu *Obrázek* \hookrightarrow *Detekce rohů*. Pro automatickou detekci významných bodů v obraze byla využita funkce:

```
cvGoodFeaturesToTrack(  
    image,              // obrázek na kterém bude detekce proveden  
    eigImage,           // pomocný obrázek  
    tempImage,          // pomocný obrázek  
    corners,            // detekované rohy  
    cornerCount,        // počet rohů  
    qualityLevel,       // min. přijatelná kvalita detekce  
)
```

5.3 Rekonstrukce bodu ve scéně

Dle návrhu je nutné pro rekonstrukci scény provést kroky, podrobně popsané v následujících podkapitolách.

5.3.1 Zadání korespondenčních bodů

Vzhledem k tomu, že uživatel automatickou detekci rohů využít nemusí, body nalezené rohovým detektorem jsou pouze informativní. Zadávání bodu probíhá střídavě na jednom

a druhém obrázku. Aby bylo možné označit bod nalezený rohovým detektorem, je nutné mít při najetí kurzoru myši na daný bod stisknutou klávesu ctrl. Celkově je vyžadováno nejméně osm párů bodů¹.

V aplikaci je postup pro zadávání bodů následující:

1. Nastavení kreslení na bod (v menu *Obrázek* \hookrightarrow *Kreslit* \hookrightarrow *Bod*)
2. Označit daný bod na první fotografii
3. Označit korespondující bod na druhé fotografii
4. opakování bodu 2. a 3. dokud nebude zadáno osm párů bodů

Každý vyznačený bod je uložen do pole vytvořeného každému obrázku. Korespondence je zajištěna stejným indexem bodů v jednotlivých polích. Tyto korespondující si body jsou využity pro odhad fundamentální matice. Pokud se uživatel splete v zadávání, je možné udělat krok zpět, který zadaný bod odstraní. Počet kroků zpět je omezen pouze počtem dosud zadaných bodů.

5.3.2 Výpočet fundamentální matice

Díky korespondujícím si bodům zadaným uživatelem lze s využitím funkcí OpenCV odhadnout fundamentální matici.

```
cvFindFundamentalMat(  
    points1, // body zadané v rámci obrázku jedna  
    points2, // body zadané v rámci obrázku dvě  
    fundMatr, // výsledná fundamentální matice  
    method, // využitá metoda  
              // CV_FM_7POINT | CV_FM_8POINT | CV_FM_RANSAC | CV_FM_LMEDS  
    param1, // parametr určující max. vzdálenost bodu od epipoláry  
)
```

5.3.3 Výpočet souřadnic epipólů

Z fundamentální matice F , která byla vypočítána v předchozím kroku, je možné vypočítat souřadnice epipólů v rovině obrazů. Dle návrhu je pro jejich výpočet využita funkce

```
cvSVD(  
    A, // vstupní matice, v tomto případě F  
    W,U,V, // výsledné matice rozkladu  
    flags1 // CV_SVD_MODIFY_A|CV_SVD_U_T|CV_SVD_V_T  
)
```

Epipól 2 lze nalézt v posledním sloupci matice U^T a epipólů 1 v posledním sloupci matice V^T .

¹Minimum korespondujících bodů pro dostupné metody je sedm. Standardně se ale využívá pro přesnější výsledky bodů osm a více

Výstupem tohoto kroku jsou souřadnice dvou epipólů. Ověření správnosti výsledku je možné provést pomocí epipolárních přímek. Každý bod zadaný v obrázku má svoji epipolární přímku. Průnikem těchto přímek je právě epipól. Epipolární přímky jsou vypočítány z fundamentální matice F a :

```
cvComputeCorrespondEpilines(
    points,      // pole vyznačených bodů v jednom z obrázků
    whichImage, // číslo obrázku, ze kterého jsou body
    F,          // fundamentální matice
    lines       // výstupní pole epipolár
)
```

Pro každý bod jednoho obrázku lze vypočítat epipoláru ve druhém obrázku, podle vzorce 2.18.

5.3.4 Stanovení projekčních matic

Výpočet projekčních matic je podrobně popsán v sekci 2.5. Při zpracování dvou obrazů je nutné počítat se dvěma projekčními maticemi P a P' . První kamera je umístěna v počátku souřadného systému scény a lze ji vyjádřit pomocí vztahu $P = [I|0]$. Projekční matici druhé kamery je nutné vypočítat dle vztahu $P' = [[e']_x F | e']$. Kde $[e']_x$ je antisymetrická matice z vektoru epipólu a lze ji vyjádřit podle vzorce:

$$[e']_x = \begin{bmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Pomocí projekčních matic je možné zrekonstruovat scénu, kterou lze následně zkalibrovat.

5.4 Kalibrace scény

Vytvořená virtuální scéna však nemá definované měřítko. To je možné určit pomocí známých rozměrů či vzdáleností, které musí uživatel na fotografiích vyznačit, jak je vidět na obrázku 5.3.

Zadávání vzdáleností pro kalibraci scény je:

1. Nastavení kreslení úsečky (v menu *Obrázek* \hookrightarrow *Kreslit* \hookrightarrow *Úsečku*)
2. Vyhledat objekt známých rozměrů na obrázku číslo jedna
3. Označit úsečkou známý rozměr
4. Vyhledat objekt známých rozměrů na obrázku číslo dva
5. Označit úsečkou známý rozměr
6. Zadat tento rozměr do aplikace
7. Opakovat krok 2. až 6.
8. Spustit přepočet



Obrázek 5.3: Hledané rozměry objektů na fotografiích zadané uživatelem

5.5 Určení vzdálenosti

Jedná-li se o scénu v metrickém prostoru, je možné dle vyznačených hodnot vypočítat reálné, tzv. metrické rozměry jednotlivých objektů.

Níže je uveden postup, jakým je možné na fotografiích zadat hledanou vzdálenost.

1. Nastavení kreslení na čáru (je-li tomu jinak)
2. Na obrázku jedna vyznačit hledanou vzdálenost
3. Stejnou hledanou vzdálenost vyznačit na obrázku dvě
4. Spustit přepočet kliknutím na tlačítko *Kalibrace scény*

Tuto část se v aplikaci nepovedlo úspěšně implementovat. Vytvořená scéna se nachází v projektivním prostoru, ve kterém nejsou zachovány reálné vlastnosti zobrazených objektů, jako jsou délka, poměry stran, tvar a úhly. Z projektivního prostoru lze dopočítat souřadnice 3D bodu v metrickém prostoru příslušnou projekční transformací, nebo zkalibrováním kamer a normalizací korespondujících si bodů.

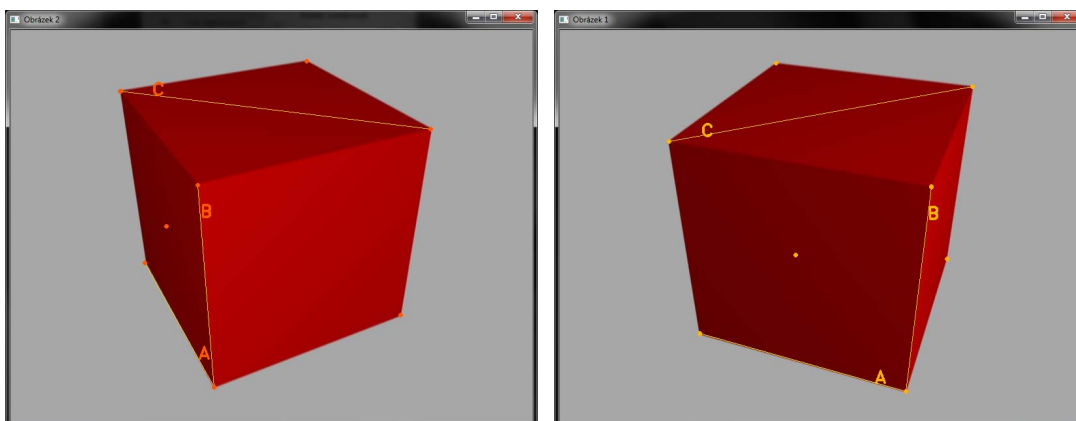
Kapitola 6

Zhodnocení výsledků

V této kapitole jsou popsány výsledky získané v aplikaci. Pro porovnání byla testována virtuální a reálná scéna. V závěru kapitoly je uvedena nevhodná scéna pro zpracování v aplikaci. Jelikož je scéna rekonstruovaná pouze v projektivním prostoru, není možné určovat výsledné, reálné vzdálenosti v obraze. Pro praktické využití aplikace by mohl být převod souřadnic projektivního prostoru do metrického dalším rozšířením aplikace.

6.1 Zpracování virtuální scény

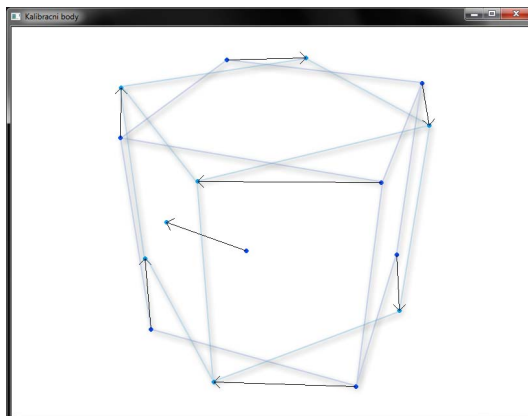
Na vstupu aplikace byly dva obrázky scény s krychlí 6.1, vytvořené v programu Blender.



Obrázek 6.1: Vstupní obrázky virtuální scény s krychlí

Postup pro vytvoření scény byl následující:

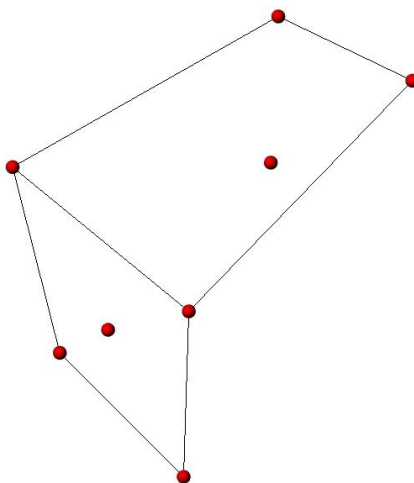
1. Načtení obrázků do aplikace, vyhledání a vyznačení osmi korespondujících si bodů
2. Vyhledání a vyznačení tří známých rozměrů pomocí úseček
3. Z korespondenčních bodů byla vypočítána fundamentální matice F
4. Pomocí SVD rozkladu matice F byly vypočítány souřadnice epipólů
5. Z epipólu byla sestavena projekční matice P
6. Využitím P a SVD rozkladu byly rekonstruovány zadané body v prostoru



Obrázek 6.2: Zobrazení korespondujících si bodů pomocí vektoru korespondence s dodatečně zvýrazněnými hranami pro lepší orientaci v obrázku.

Podrobný výpis vypočítaných hodnot je vypsán v příloze [A.1](#).

Na obrázku [6.3](#) jsou pro názornost rekonstruované body ve scéně zobrazeny pomocí grafického 3D programu.



Obrázek 6.3: 3D body scény zobrazené v projektivním prostoru

6.2 Zpracování reálné, zaměřené scény

Pro porovnání výsledků byla zpracována i reálná scéna, ve které byly vhodné objekty přeměřeny a jednotlivé vzdálenosti byly zaměřeny pomocí totální stanice a kalibrovaných metrů, viz. obrázek [6.6](#). Postup byl stejný jako v předchozím kroku. Stejně tak i podrobný výpis vypočítaných hodnot lze nalézt v příloze [A.2](#)

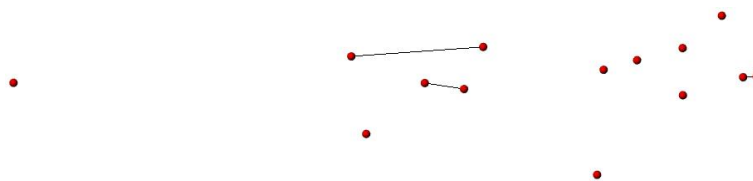
Rekonstruované body scény jsou zobrazeny pomocí grafického 3D programu v obrázku [6.5](#). Propojené body jsou zvýrazněné úsečky zadané uživatelem pro výslednou kalibraci scény.



Obrázek 6.4: Vstupní obrázky reálné scény

Na obrázku 6.6 jsou zobrazené zaměřené předměty pomocí kalibrovaného metru. Díky těmto vzdálenostem je možné ověřit správnost vypočtených hodnot, či mohou posloužit jako zdroj pro zadání známých rozměrů v obrázku.

Jednotlivé vzdálenosti lze ze scény získat v prostředí aplikace VirtualCrash, ve které lze zaměřené hodnoty zobrazit a dále zpracovávat.



Obrázek 6.5: Body zobrazené v projektivním prostoru

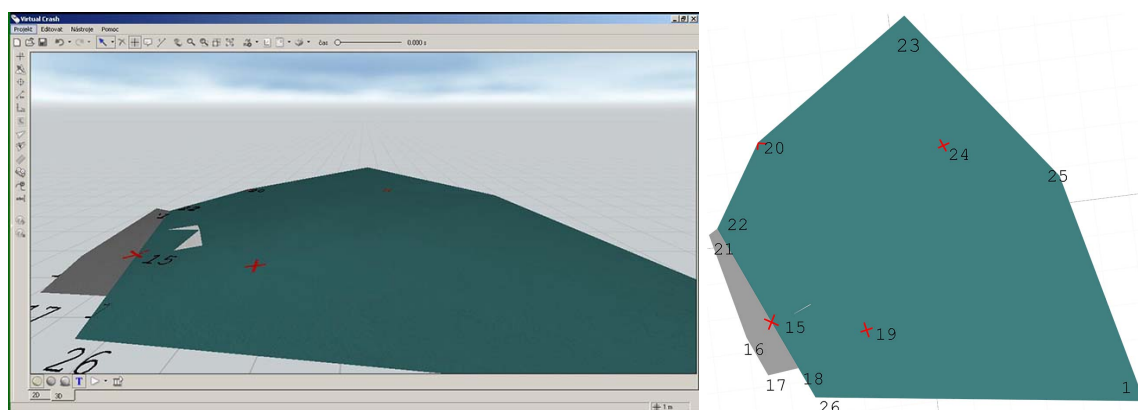


Obrázek 6.6: Změřené objekty v reálné scéně

6.3 Nevhodná scéna pro zpracování v aplikaci

Fotodokumentace dopravních nehod může obsahovat mnoho fotografií, na kterých je místo dopravní nehody zaznamenané. Je však dobré počítat s tím, že ne všechny fotografie je možné využít pro další zpracování. Šum, rozostření, nevhodné osvětlení či překrytí důležitých míst jinými objekty není nic neobvyklého.

Ukázka fotografií z místa dopravní nehody je znázorněná na obrázku 6.8. Jak je vidět, rozlišit správné stopy po vozidle od okolních je takřka nemožné. Jediné čeho se lze na fotografii chytit je místo, vyznačené cedulkou s číslem. A i když je toto místo vidět na obou fotografiích, vyznačit více korespondujících si bodů na povrchu tvořeném šterkem není reálné. Ani automatická detekce výrazných bodů v obraze nezvyšuje pravděpodobnost použitelných výsledků.



Obrázek 6.7: Scéna zaměřená totální stanicí s vyznačenými a zaměřenými bod, zobrazené v programu VirtualCrasch 3.1



Obrázek 6.8: Ukázka fotodokumentace zaznamenávající místo dopravní nehody, nevhodná pro zpracování, převzato a upraveno [4]

Kapitola 7

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit uživatelsky praktickou aplikaci, která bude zpracovávat dvě fotografie, na kterých uživatel vyznačí korespondující si body tak, aby bylo možné dopočítat prostorové informace, díky kterým je pak možné vypočítat reálné, uživatelem vyznačené vzdálenosti.

K vytvoření scény, ve které tyto vzdálenosti bude možné vypočítat je nutné postupně provést několik kroků. Musíme však počítat s tím, že s každým krokem vznikají určité nepřesnosti, které se sčítají. A ne vždy je možné tyto nepřesnosti eliminovat. Výsledek se tak může poměrně lišit od skutečnosti.

Stěžejní fází pro rekonstrukci scény je ruční zadávání korespondujících si bodů. Vzhledem k typu zpracovávaných fotografií nelze ve většině případů pro zpřesnění výsledků automatickou detekci či korespondenci využít. Na fotografiích bývá málo výrazných bodů, hran, nebo objektů, které by zadávání zpřesnily. Dokonce ani s dostatečnými znalostmi a zkušenostmi není jednoduché totožné objekty rozpoznat. Zvláště jedná-li se o části vozidel, dopravního značení, rozbité předměty a jiné důkazy, které z různých úhlů mohou vypadat jinak. Obecně platí, že čím více korespondencí lze zadat, tím přesnější jsou výsledky. V aplikaci je minimální počet korespondujících si bodů nastaven na osm. A to proto, že menší počet bodů znemožní výpočet důležitých parametrů, které jsou využívány pro rekonstrukci scény.

Co se samotné kalibrace scény týká, je možné na fotografiích nalézt objekty, které mají standardizované rozměry. Jedná se například o dopravní značení, svodidla, RZ a rozměry automobilů. U těchto objektů lze reálné rozměry nalézt, aniž by je bylo nutné ručně přeměřit. Popřípadě je možné přeměřit jiný, leč rozměrově totožný předmět. Díky těmto objektům lze vypočítanou scénu zkalibrovat. Jinými slovy určit měřítko, díky kterému je možné přepočítat vzdálenosti vyznačené na obrázku se vzdálenostmi ve 3D scéně.

Vzhledem ke všem úskalím, se kterými jsem se při vypracování této práce setkala, se mi podařilo vytvořit aplikaci, která ze dvou fotografií, na kterých jsou uživatelem vyznačené korespondující si body, vypočítá pozici těchto bodů v prostoru. Jedná se však o projektivní prostor, ve kterém není možné vypočítat reálné vzdálenosti. Převod do metrického prostoru nebyl v aplikaci uspokojivě implementován.

Možným rozšířením aplikace je minimalizace chyb, vzniklých při výpočtech. Například zpřesněním výběru bodů, automatickým dopočtem dalších korespondujících si bodů a podobně. V rámci uživatelského prostředí by mohla být aplikace doplněna o funkce, které by uživateli zjednodušily práci. Jako možnost zadávání známých vzdáleností pouze v rámci

jednoho obrázku a automatické dopočítání korespondence. Dalším rozšířením by mohl být výše zmíněný přepoččet souřadnic z projektivního do metrického prostoru. Ve kterém by bylo možné vyhledat reálné vzdálenosti.

Literatura

- [1] *HISTORY OF PHOTOGRAMMETRY*. Ferris State University.
- [2] PC Rect program pro analýzu dopravních nehod.
URL http://www.pccrash.cz/?page_id=23
- [3] PolCam Police Camera Video.
URL http://www.pol-cam.com/polcam_ec_II_stalker.html
- [4] Odborné vyjádření: Analýza pohybu vozidla v čase a prostoru, 2011.
- [5] 2011, M.: Microsoft Visual Studio.
URL <http://www.microsoft.com/cze/msdn/vstudio/2010/>
- [6] Albertz, J.: *ALBRECHT MEYDENBAUER PIONEER OF PHOTOGRAMMETRIC DOCUMENTATION OF THE CULTURAL HERITAGE*. Technical University of Berlin.
- [7] Bradski, K. A., Gary R.: *Learning OpenCV : computer vision with the OpenCV library*. O Reilly, c2008, ISBN 978-0-596-51613-0.
- [8] David A. Forsyth, J. P.: *Computer vision a modern approach*. Prentice-Hall, 2003, ISBN 0-13-191193-7.
- [9] Doc. Ing. Albert Bradáč, D. a. k.: *Soudní inženýrství*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 1999, ISBN 80-7204-133-9.
- [10] Dr. Ing. Karel Pavelka: *Fotogrammetrie 10*. Vydavatelství VUT, 2003, ISBN 80-01-02649-3.
- [11] Duraiswami, R.: Camera Calibration.
URL <http://www.umiacs.umd.edu/~ramani/cmsc828d/lecture9.pdf>
- [12] Hartley, R.: *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, 2008, ISBN 0-0521-54051-8.
- [13] Ing. Albert Bradáč, I. J. S., Ph.D.: *XVI. mezinárodní konference analytiků dopravních nehod 2011, Vehicle Forensic Science 2011*. Vysoké učení technické v Brně, 2011, ISBN 978-80-214-4294-8.
- [14] Český úřad zeměměřický a katastrální: Státní správa zeměměřictví a katastru ČR.
URL <http://www.cuzk.cz/>

- [15] Knowledge base Publisher (Knowledgebase software): What is Camera Calibration and how good is PhotoModeler's?
URL <http://www.photomodeler.com/kb/entry/26/>
- [16] Megapixel: Nikon D5000 tělo.
URL <http://www.megapixel.cz/nikon-d5000#parameters>
- [17] Megapixel: Objektiv Nikon 18-55 mm F 3,5-5,6 G AF-S DX VR.
URL <http://www.megapixel.cz/nikon-18-55-mm-f-3-5-5-6-g-af-s-dx-vr#>
- [18] M.Software: Accident Reconstruction.
URL <http://www.msoftware.co.za/pmaccident.html>
- [19] M.Software: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR).
URL http://www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabid-4853/6084_read-9201/
- [20] Navab, N.: *3D Computer Vision Camera Models*. Technische universität München, 21 December 2005.
- [21] Pavel Zemčík, Michal Špaňel, Vítězslav Beran a spol.: *Zpracování obrazu, studijní opora*. 2011.
- [22] Roman, P.: Objektivy, jak vybrat a používat - 1. Parametry objektivů.
URL http://www.fotografovani.cz/art/tech_vybirame_jak/rom_lenses1.html
- [23] Sieger, L.: JAKÝ JE MAKRO OBJEKTIV NIKKOR 60MM F/2.8G ED AF-S?
URL <http://nikonclub.cz/jaky-je-makro-objektiv-nikkor-60mm-f28g-ed-af-s>
- [24] Yi Ma, Stefano Soatto, Jana Kosecka, S. Shankar Sastry: *An invitation to 3-D vision: from images to geometric models*. Springer, 2006, ISBN 0-387-00893-4.

Příloha A

Detailní výpis výsledných hodnot

A.1 Virtuální scéna s krychlí

2D souřadnice 8 korespondujících si bodů

2D: [212,466] [205,358]
2D: [530,553] [311,547]
2D: [165,170] [167,93]
2D: [567,239] [286,236]
2D: [331,49] [453,46]
2D: [632,84] [644,149]
2D: [593,352] [599,437]
2D: [355,351] [240,298]

Vypočtená fundamentální matice

2,27273244490789E-06		3,55962924913911E-06		-0,0029000628273934
-6,99637621437432E-06		4,22003222411149E-06		0,00653108209371567
0,000128607716760598		-0,00717142224311829		1

Vypočtené epipóly a epipolárních linií

EPIPÓL 2: 1438,81823730469 | 485,774200439453 | 1

EPIPÓL 1: 1028,7412109375 | 157,894027709961 | 1

EPIPOLÁRNÍ PŘÍMKY:

-0,107780672609806		0,994174718856812		-327,857727050781
0,0528593398630619		0,998601973056793		-561,132934570313
-0,300468027591705		0,953791916370392		-31,007848739624
-0,207831457257271		0,978164672851563		-176,130218505859
-0,406581372022629		0,913614571094513		141,181793212891
-0,424037247896194		0,905644774436951		170,168273925781
-0,0791607573628426		0,99686187505722		-370,340606689453
-0,154805421829224		0,987944960594177		-257,173583984375

Vypočtená projekční matice

0,06248130649328	-3,4836962223053	485,767669677734	1438,818237304
-0,18504086136817	10,318376541137	-1438,82116699219	485,7742004394
-0,01117054838687	0,0043426831252	10,8058156967163	1

Vypočtené body v projektivním prostoru

3D :	[81,28545	176,9182	0,3765244]
3D :	[162,7796	169,8624	0,3069235]
3D :	[121,3172	128,6089	0,725077]
3D :	[350,5394	145,7634	0,616482]
3D :	[109,2943	16,49429	0,3301774]
3D :	[194,8043	33,27582	0,3092]
3D :	[122,1347	74,41025	0,2031303]
3D :	[164,3423	156,8301	0,4549822]

A.2 Reálná scéna s autem

Výpočtené vnitřní parametry fotoaparátu

1.15878601e+003	0	4.39480713e+002
0	1.15878601e+003	3.54573700e+002
0	0	1

2D souřadnice korespondujících si bodů

2D: [86,442]	[285,397]
2D: [514,387]	[537,338]
2D: [379,364]	[452,317]
2D: [361,189]	[381,142]
2D: [777,263]	[586,233]
2D: [675,452]	[817,374]
2D: [55,316]	[114,271]
2D: [107,593]	[759,480]

Výpočtená fundamentální matice

2,00814142203853E-07	3,19062201015186E-06	-0,00060904619749635
8,46311365876318E-07	1,33545484004571E-06	0,00804887618869543
-0,00074977392796427	-0,0104592842981219	1

Vypočtené epipóly a epipolární linie

EPIPÓL 2: 3227,92529296875 | 120,009635925293 | 1

EPIPÓL 1: -10890,5771484375 | 876,359558105469 | 1

EPIPOLÁRNÍ PŘÍMKY:

0,0935372933745384		0,995615780353546		-421,412658691406
0,0807230621576309		0,996736586093903		-380,184051513672
0,0707871615886688		0,997491419315338		-348,202545166016
0,00772334868088365		0,999970197677612		-144,936157226563
0,0425903126597404		0,999092638492584		-257,378021240234
0,10444400459528		0,9945307970047		-456,488250732422
0,0481084398925304		0,998842120170593		-275,159912109375
0,144522801041603		0,989501476287842		-585,255126953125

Výpočtená projekční matice

0,06248130649328		-3,4836962223053		485,7676696777		1438,818237304
-0,18504086136817		10,318376541137		-1438,821166992		485,7742004394
-0,01117054838687		0,0043426831252		10,80581569671		1

Vypočtené body v projektivním prostoru

3D	:	[30,02841		154,4669		0,3490853]
3D	:	[86,62156		65,23222		0,1685234]
3D	:	[79,35445		76,21539		0,2093924]
3D	:	[95,77015		50,13827		0,2652859]
3D	:	[118,0651		40,02128		0,151946]
3D	:	[65,77646		44,14085		0,0974416]
3D	:	[50,2393		289,211		0,9126832]
3D	:	[11,79474		65,29738		0,1102494]

Příloha B

Uživatelské rozhraní aplikace

Aplikace je tvořena jedním oknem, které obsahuje hlavní menu (viz. B.1) a komponenty pro výpis vypočítaných a zadaných hodnot.

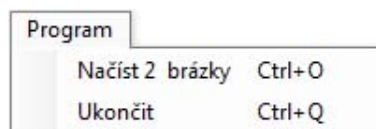
The screenshot shows the 'Fotogrammetrická analýza obrazů' application window. It features a menu bar with 'Program', 'Obrázek', 'Upravit', 'Kreslit', 'Kalibrace', and 'Nápověda'. The main interface is divided into several sections:

- Kalibrační parametry:** Fields for Fx (1158,78601074219 px), Fy (1158,78601074219 px), Cx (439,480712890625 px), Cy (354,573699951172 px), and S (0).
- Vzdálenosti:** Fields for A (1200 mm), B (520 mm), and C (680 mm), with a 'Kalibrace scény' button.
- Optické zkreslení:** Fields for Radiální and Tangentiální distortion, and buttons for 'Zobrazit vektor korespondence', 'Vypsat body zadané uživatelem', and 'Promazat níže vypsane hodnoty'.
- Uživatelsky zadané body:** A list of 2D points in [x;y] format, including [86,442][285,397], [514,387][537,338], [379,364][452,317], [361,189][381,142], [777,263][586,233], [675,452][817,374], [55,316][114,271], and [107,593][759,480].
- Vypočítané hodnoty:** A large text area displaying calculated values, including the 'FUNDAMENTÁLNÍ MATICE' and 'PROJEKČNÍ MATICE'.

Obrázek B.1: Uživatelské rozhraní aplikace s vypsáním hodnotami

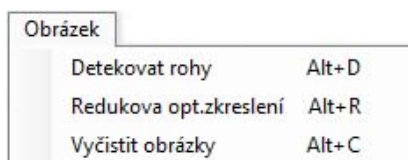
Využití a význam jednotlivých položek v nemu je:

- **Program** obsahuje dvě položky:
 - **Načíst 2 obrázky** tato položka slouží pro načtení dvou obrázků, které budou dále zpracovávány.
 - **Ukončit** pro ukončení celé aplikace.



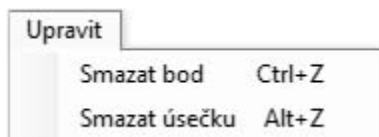
Obrázek B.2: Položka menu Program

- **Obrázek** obsahuje tři položky pro práci s obrázkem:
 - **Detekovat rohy** je-li tato položka zatržena, budou se v načtených obrázcích automaticky detekovat rohy
 - **Retukovat optické zkreslení** je-li tato položka zatržena, provede se korekce optického zkreslení načtených obrázků. Pro redukci optického zkreslení je nutné mít parametry optického zkreslení, které jsou získány při kalibraci. Nejsou-li načteny, nebo není-li provedena kalibrace, není tato položka přístupná.
 - **Vyčistit obrázky** tato položka slouží k vymazání všech operací, které byly nad obrázkem doposud realizovány.



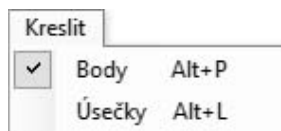
Obrázek B.3: Položka menu Obrázek

- **Upravit** obsahuje dvě položky pro práci se zadanými body a úsečkami v obrázcích:
 - **Smazat bod** pro smazání bodů, které jsou k dispozici. Počet kroků zpět je omezen pouze počtem již zadaných bodů.
 - **Smazat úsečku** pro smazání úseček, které jsou k dispozici. Počet kroků zpět je opět omezen pouze počtem již zadaných úseček.



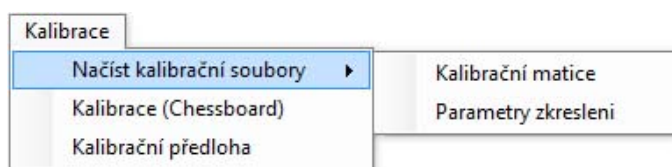
Obrázek B.4: Položka menu Upravit

- **Kreslit** umožňuje nastavit kreslení na:
 - **Body** díky kterým je možné v obrázcích zadat korespondující si body.
 - **Úsečky** kterými jsou v obrázcích vyznačené známé a hledané vzdálenosti.



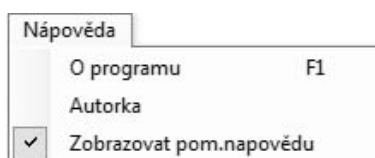
Obrázek B.5: Položka menu Upravit

- **Kalibrace** umožňuje realizovat proces kalibrace:
 - Načíst kalibrační soubory z externích souborů typu XML, které byly vytvořeny při dřívější kalibraci:
 - * **Kalibrační matice**
 - * **Parametry zkreslení**
 - **Kalibrace (Chessboard)** umožňuje načíst tři obrázky s kalibračním vzorem šachovnice.
 - **Kalibrační předloha** zobrazí kalibrační předlohu šachovnice, která je využita v procesu kalibrace.



Obrázek B.6: Položka menu Kalibrace

- **Nápověda**
 - **O programu** zobrazí programovou nápovědu prostřednictvím internetového prohlížeče.
 - **O autorce** zobrazí dialogové okno se stručným popisem o autorce.
 - **Zobrazovat pom. nápovědu** tato položka umožňuje nastavit, zda bude v programu uživateli při zadávání hodnot zobrazena pomocná nápověda, či nikoli.



Obrázek B.7: Položka menu Nápověda

Příloha C

Technické vybavení pro záznam digitálního obrazu

Testování aplikace probáhalo na již existujících fotografiích, nebo na fotografiích pořízených digitální zrcadlovkou Nikon D5000.



Obrázek C.1: Nikon D5000 s objektivem 18-55 mm F 3,5-5,6 G AF-S DX VR, převzato z [16]

C.1 Fotoaparát Nikon D5000

Je digitální jednooká zrcadlovka s obrazovým snímačem CMOS obsahujícím 12,3 milionu efektivních pixelů, systémem zpracování obrazu Nikon EXPEED, rychlým a přesným jedenácti bodovým autofokusem, odolnou a výkonnou závěrkou. Vysokou kvalitu obrazu podporuje také systém čištění obrazového snímače zahrnující systém kontroly toku vzduchu v zrcadlovém boxu, funkce Active D-Lighting a nastavení pro optimalizaci snímků.

Je vybaven technologií záznamu videosekvencí v HD kvalitě. Díky množství zabudovaných editačních funkcí, rozsáhlé nabídce motivových programů, obrazovému snímači s 12,3 milionu pixelů a velkému rozsahu citlivostí v rozmezí ISO 200 až ISO 3200 lze snadno pořídit vysoce kvalitní snímky. Disponuje výklopným a otočným 2,7" LCD displejem, který umožňuje snímání z libovolného úhlu.[16]



Obrázek C.2: CMOS sensor s jeho čistící jednotkou, převzato a upraveno z [16]

Technické parametry fotoaparátu

Jsou popsány v tabulce C.1

C.2 Objektiv Nikon 18-55 mm F 3,5-5,6 G AF-S DX VR

Rozmezí zoomu pokrývá 18 až 55 mm (ekvivalent 35 mm: 27-82.5mm). Je vhodný pro vytváření každodenních i speciálních snímků. Systém redukce vibrací (VR) umožňuje flexibilní fotografování z ruky a dovoluje fotografovat až o 3 stupně času závěrky pomaleji. Asférické optické členy minimalizují sférickou aberaci, astigmatismus a jiné formy zkreslení a zajišťují vysoké rozlišení a kontrast. Je vybaven ultrazvukovým zaostřovacím motorem (SWM) pro rychlé, přesné a zvláště tiché zaostřování [17].

Technické parametry objektivu

Jsou popsány v tabulce C.1

PARAMETR	POPIS
Minimální ohnisková vzdálenost	18 mm
Maximální ohnisková vzdálenost	55 mm
Světelnost	3,5 - 5,6
Maximální clona	36
Minimální zaostřovací vzdálenost	28 cm
Poměr zobrazení	1:3,1
Stabilizace	Ano
Průměr filtru	Ano
Délka	79,5 mm
Hmotnost	265 g

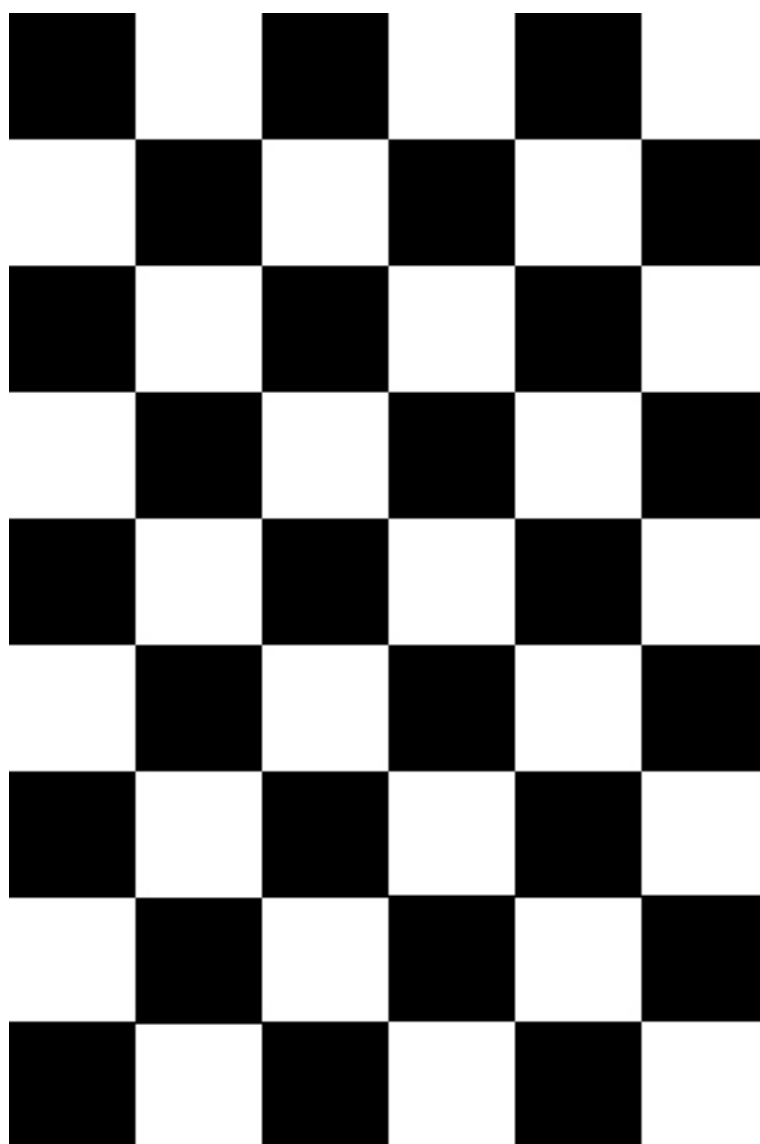
Tabulka C.1: Objektiv Nikon 18-55 mm F 3,5-5,6 G AF-S DX VR [17]

PARAMETR	POPIS
Obrazový snímač	
Efektivní počet pixelů	12,3 Mpx
Celkový počet pixelů	12,9 Mpx
Typ snímače	CMOS
Velikost snímače	23,6 x 15,8 mm
Rozlišení fotografií	4288 x 2848, 3216 x 2136, 2144 x 1424
Poměr stran	3:2
Typ barevného filtru	RGB
Protiprachová ochrana	Ano
Crop faktor	1,5
Obrazový procesor	
Typ obrazového procesoru	Nikon EXPEED
Nastavení expozice	
Kompenzace expozice	+/- 5 EV po 1/2 nebo 1/3 EV
Citlivost ISO	100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400
Závěrka	
Rychlost závěrky	30-1/4000 s + Bulb
Hledáček	
Hledáček	Ano
Pokrytí	95%
LCD	
Velikost LCD	2,7 palce
Live View	Ano
Rozlišení LCD	230 000 px
Blesk	
Blesk	Ano
Režimy blesku	Auto, Portrét, Děti, Makro, Noční portrét, Párty/interiér, Portrét zvířat: Automatická aktivace blesku s automatickým vyklopením do pracovní polohy
Rychlost X-sync	1/200 s
Směrné číslo	18
Záznam	
Paměťové karty	SDHC, SD
Videosekvence	1280 x 720, 640 x 424, 320 x 216 - 24 sn./s
Audiozáznam	ano
Rozhraní a napájení	
Rozhraní	USB 2.0, AV výstup, HDMI, Konektor pro připojení příslušenství
Napájení	Akumulátor
Životnost baterie	510 snímků
Typ akumulátoru	EN-EL9a
Fyzikální specifikace	
Hmotnost	560 g
Rozměry	127 x 104 x 80 mm

Tabulka C.2: Technické parametry Nikon D5000 [16]

Příloha D

Kalibrační vzor



Obrázek D.1: Kalibrační vzor šachovnice

Příloha E

Obsah CD-R

- písemná zpráva ve formátu PDF
- DOC adresář s kódy pro latex se všemi náležitostmi
- SRC adresář se zdrojovými kódy